



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**SKIN EFEKT VE VYSOKOOTÁČKOVÝCH ELEKTRICKÝCH
STROJÍCH.**

SKIN EFFECT IN HIGH-SPEED ELECTRICAL MACHINES.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Klíma

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Petr Klíma

ID: 173673

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Skin efekt ve vysokootáčkových elektrických strojích.

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte model stroje v programu pro výpočty metodou konečných prvků.
2. Proveďte simulace navržených možností snížení vlivu skin efektu.
3. Vyhodnoťte výsledky simulací.
4. Navrhněte nejvhodnější způsob potlačení vlivu skin efektu pro výrobu prototypu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PYRHONEN, J.; JOKINEN t.; HRABOVCOVÁ V. Design of rotating eletrical machines. John Wiley and Sons, 2007. ISBN 978-0-470-69516-6.

[2] D. Gerada, A. Mebarki, N. L. Brown, C. Gerada, A. Cavagnino and A. Boglietti, "High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 6, pp. 2946-2959, June 2014. doi: 10.1109/TIE.2013.2286777 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6644302&isnumber=6690243>

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá potlačením vlivu skin a proximity efektu ve vysokootáčkových strojích. V první části jsou shrnuté obecné poznatky o vysokootáčkových strojích. Druhá část je věnována principu a možným potlačením důsledků způsobených skin a proximity efektem. Ve třetí části jsou ukázány výsledky simulací vytvořených modelů pro synchronní stroj s permanentními magnety. Na výsledcích těchto simulací je ukázán vliv skin a proximity efektu. Dále jsou navržena konstrukční opatření na omezení těchto a dalších nežádoucích jevů, aby bylo dosaženo co největší účinnosti.

Klíčová slova

Vysokootáčkové stroje, skin efekt, proximity efekt, hloubka vniku, vířivé proudy

Abstract

This master thesis deals with the suppression of the skin and proximity effects in high-speed machines. The first part summarizes the general knowledge of high-speed machines. The second part is devoted to the principle and possible suppression of consequences caused by skin and proximity effects. The third part shows the simulation results of models of a synchronous machine with permanent magnets. The results of these simulations reveal the consequences of skin and proximity effects. In addition, design measures are proposed to limit these and other undesirable phenomena to achieve the highest possible efficiency.

Keywords

High-speed machine, skin effect, proximity effect, depth of penetration, eddy currents

Bibliografická citace:

KLÍMA, Petr. *Skin efekt ve vysokootáčkových elektrických strojích*. . Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117011>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Martin Mach.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Skin efekt ve vysokootáčkových elektrických strojích* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: **20. května 2019**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Machovi, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **20. května 2019**

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Vysokootáčkové stroje	7
2.1	Příklady aplikací.....	8
2.1.1	Elektricky asistované turbodmychadlo	8
2.1.2	Setrvačnickový akumulátor	8
2.1.3	Vysokootáčkové vřeteno.....	9
2.2	Materiály	9
2.2.1	Elektrotechnické oceli.....	9
2.2.2	Slitiny mědi.....	10
2.2.3	Permanentní magnety	10
2.3	Technologie vysokootáčkových strojů.....	11
2.3.1	Asynchronní motory	11
2.3.1.1	Hladký plný rotor	11
2.3.1.2	Axiálně drážkovaný plný rotor	11
2.3.1.3	Plný rotor s povrchovou vrstvou	12
2.3.1.4	Rotor s klecí nakrátko.....	12
2.3.2	Stroje s permanentními magnety	12
2.3.2.1	Bezdrážkové vinutí	12
2.3.3	Spínaný reluktanční motor.....	13
3	Skin a proximity efekt.....	14
3.1	Hloubka vniku	14
3.2	Vodič složený z paralelních vláken.....	15
3.2.1	Kroucený vodič.....	16
3.2.2	Vodič typu Litz	16
3.3	Vliv konstrukce vodiče na ztráty vířivými proudy	17
3.3.1	Svazkové vířivé proudy	17
3.3.2	Vířivé proudy ve vlákně	18
3.4	Vnější magnetické pole působící na vinutí	18
3.4.1	Proximity efekt způsobený magnetizačním tokem	19

3.4.2	Proximity efekt způsobený rozptylovým tokem drážky	19
4	Návrh potlačení vlivu skin a proximity efektu v konkrétním stroji.....	21
4.1	Parametry optimalizovaného stroje.....	21
4.2	Parametry simulace	21
4.2.1	Zvolená síť v simulaci	22
4.3	Postup optimalizace	23
5	Model bezdrážkového stroje	25
5.1	Výchozí neoptimalizovaný návrh	25
5.1.1	Zjednodušený model.....	25
5.1.2	Model s vlivem skin a proximity efektu	27
5.1.3	Návrh změn pro zlepšení účinnosti výchozího stroje	31
5.2	Upravený návrh s vodičem typu Litz	31
6	Model stroje s drážkami	33
6.1	Výchozí neoptimalizovaný návrh	33
6.1.1	Zjednodušený model.....	33
6.1.1.1	Vliv délky vzduchové mezery na ztráty v rotoru	34
6.1.1.2	Výsledky simulace.....	36
6.1.1.3	Nevyváženost radiálních sil působících na rotor	37
6.1.2	Model s vlivem skin a proximity efektu	37
6.1.2.1	Výsledky simulace.....	38
6.1.2.2	Vliv proximity efektu na proudovou hustotu ve vinutí	39
6.2	Upravený návrh.....	41
6.2.1	Zjednodušený model.....	41
6.2.1.1	Výsledky simulace.....	42
6.2.1.2	Vliv otevření na průběh magnetické indukce v drážce	43
6.2.2	Model s vlivem skin a proximity efektu	44
6.2.2.1	Vliv zaplnění drážky na ztráty ve vinutí.....	44
6.2.2.2	Celkové výsledky simulace upraveného modelu	47
7	Závěr.....	49

Seznam obrázků

Obr. 2-1: Příklad závislosti hmotnosti aktivních částí dvoupólového asynchronního motoru o výkonu 22kW na frekvenci [11].....	7
Obr. 3-1: Skin a proximity efekt [5]	14
Obr. 3-2: Proudý ve svazku paralelních vodičů [6]	16
Obr. 3-3: Vodič typu Litz [8]	17
Obr. 3-4: Porovnání ztrát způsobených svazkovými vířivými proudy [8]	18
Obr. 3-5: Magnetizační tok procházející bezdrážkovým vinutím	19
Obr. 3-6: Rozptylový tok statorové drážky [10]	20
Obr. 4-1: Síť v oblasti vinutí.....	23
Obr. 4-2: Síť v oblasti vzduchové mezery	23
Obr. 5-1: Zjednodušený výchozí model bezdrážkového stroje	26
Obr. 5-2: Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře.....	27
Obr. 5-3: Výchozí model stroje s kulatými vodiči.....	28
Obr. 5-4: Výchozí model stroje s obdélníkovými vodiči.....	28
Obr. 5-5: Proudová hustota v kruhových vodičích výchozího modelu	29
Obr. 5-6: Proudová hustota v obdélníkových vodičích výchozího modelu.....	30
Obr. 5-7: Vodič typu Litz se třemi paralelními vlákny.....	32
Obr. 6-1: Zjednodušený výchozí model stroje s drážkami	34
Obr. 6-2: Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře výchozího modelu	35
Obr. 6-3: Přesycený zub modelu se třemi drážkami	36
Obr. 6-4: Radiální síly působící na rotor	37
Obr. 6-5: Výchozí model stroje s drážkami	38
Obr. 6-6: Proudová hustota ve vinutí výchozího modelu	39
Obr. 6-7: Rozložení proudové hustoty ve vodiči v blízkosti otevření drážky	40
Obr. 6-8: Rozložení magnetické indukce v drážce	40
Obr. 6-9: Zjednodušený upravený model	41
Obr. 6-10: Průběh indukce ve vzduchové mezeře upraveného stroje.....	42
Obr. 6-11: Průběh magnetické indukce pro různá otevření drážek	43
Obr. 6-12: Modelovaná zaplnění drážek.....	44
Obr. 6-13: Proudová hustota ve vinutí upraveného modelu s vinutím A	45

Obr. 6-14: Proudová hustota ve vinutí upraveného modelu s vinutím B	46
Obr. 6-15: Průběh proudové hustoty ve vodiči s největším vlivem proximity efektu, varianta vinutí A	46
Obr. 6-16: Upravený model s vlivem skin a proximity efektu	47

Seznam tabulek

Tabulka 3-1: Hloubka vniku mědi pro vybrané frekvence	15
Tabulka 5-1: Výsledky simulace zjednodušeného výchozího modelu	26
Tabulka 5-2: Výsledky simulace výchozího modelu.....	29
Tabulka 6-1: Vliv délky vzduchové mezery na ztráty v rotoru	34
Tabulka 6-2: Výsledky simulace zjednodušeného výchozího modelu stroje	36
Tabulka 6-3: Výsledky simulace výchozího modelu stroje.....	38
Tabulka 6-4: Výsledky simulace zjednodušeného upraveného modelu	42
Tabulka 6-5: Vliv otevření drážek na ztráty v rotoru	43
Tabulka 6-6: Ztráty ve vinutí pro různé konfigurace zaplnění drážky	45
Tabulka 6-7: Porovnání AC a DC odporů aktivní části vinutí	46
Tabulka 6-8: Výsledky simulace upraveného modelu s vinutím A.....	48

1 ÚVOD

Průmyslový a akademický vývoj vysokootáčkových strojů zažívá v poslední době značný rozmach. Vysoké otáčky těchto strojů znamenají, že pro dosažení stejného výkonu, jaký mají stroje s nižšími otáčkami, je nutný nižší moment. Moment stroje je jedním z parametrů určujícím jeho rozměry, tím pádem mají tyto stroje menší rozměry a vyšší hustotu výkonu. Otáčky těchto strojů se pohybují od tisíců do statisíců otáček. V řadě aplikací je požadavek vyšších otáček než při použití síťové frekvence. V těchto případech by bylo nutné použít v pohonu převodovku. Ta do systému přináší ztráty, nespolehlivost a finanční náklady. Při použití vysokootáčkových strojů v těchto aplikacích odpadá nutnost jejího použití a tyto problémy se nevyskytují.

Vysoké otáčky vysokootáčkových strojů vyžadují vysokou napájecí frekvenci. Ta se může pohybovat, v závislosti na požadovaných otáčkách a počtu pólů, až v řádu kilohertzů. Při takto vysokých frekvencích je nutno při návrhu strojů počítat s jevy jako skin a proximity efekt. Tyto jevy mění rozložení proudové hustoty ve vodičích a tím v nich způsobují zvýšení ztrát. Pro dosažení vysoké účinnosti strojů je nutné jejich potlačení. [1]

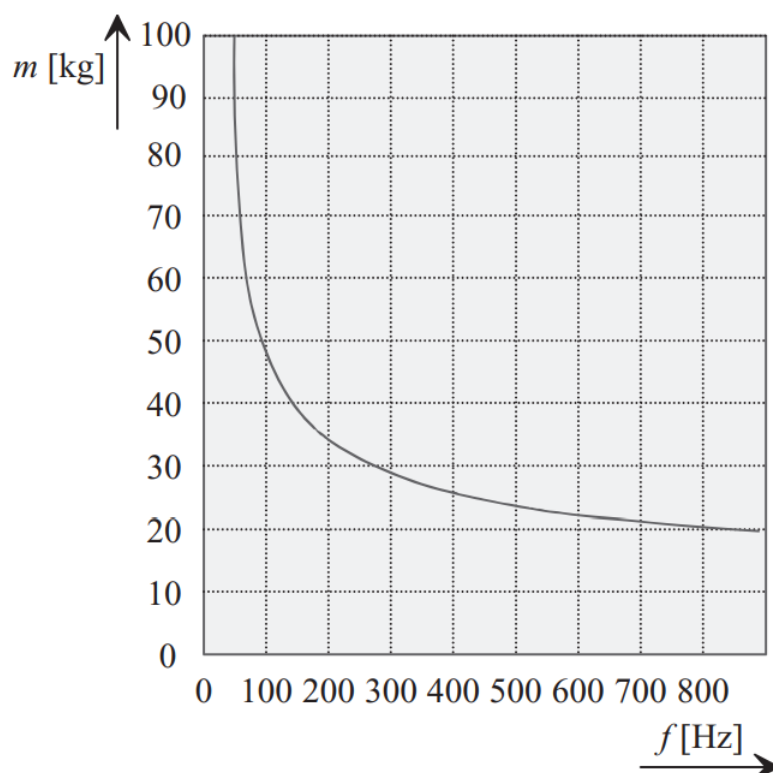
2 VYSOKOOTÁČKOVÉ STROJE

V řadě aplikací, jako jsou například elektrické pohony pro frézy a broušení, turbodmychadla, motory helikoptér a závodních vozidel a palivové pumpy, nacházejí využití vysokootáčkové stroje. Typické pracovní rychlosti těchto aplikací se pohybují od deseti až po stovky tisíc otáček za minutu.

V poslední době se velmi zvýšil zájem o výzkum a využití těchto strojů. Předpokládá se, že tato oblast výzkumu bude v následujících letech dominovat výzkumu elektrických pohonů. To je částečně způsobeno nynějšími zlepšeními v klíčových technologiích a kvůli velkému dopadu, který budou mít tyto stroje v aplikačních oblastech.

Impulzem umožňujícím vývoj těchto strojů je rozvoj výkonové elektroniky umožňující vyšší pracovní frekvence než dříve. Taktéž vývoj v oblasti magneticky měkkých a tvrdých materiálů schopných snést vyšší mechanické namáhání při nízkých střídavých ztrátách umožňuje vyšší obvodové rychlosti a hustotu výkonu.

[1]



Obr. 2-1: Příklad závislosti hmotnosti aktivních částí dvoupólového asynchronního motoru o výkonu 22kW na frekvenci [11]

2.1 Příklady aplikací

V některých aplikacích nahrazuje vysokootáčkový stroj existující vysokootáčkový mechanický systém, zatímco někde s ním na výsledné činnosti spolupracuje. Příklady využití těchto strojů jsou například jako elektricky asistované turbodmychadlo, setrvačnickový akumulátor, vysokootáčkové vřeteno, kompresor a turbomolekulární vývěva. [1]

2.1.1 Elektricky asistované turbodmychadlo

Zvyšující se požadavky na snížení emisí a vyšší účinnost spalovacích motorů v automobilovém průmyslu podporují zavádění hybridních pohonných jednotek, kde vysokootáčkové stroje nacházejí uplatnění.

Příkladem takového využití je elektricky asistované turbodmychadlo. Vysokootáčkový stroj je umístěn na stejné hřídeli jako turbína a kompresor turbodmychadla. Při rozjezdu a řazení rychlosti, kdy je energie proudu výfukových plynů nedostatek, je stroj použitý jako motor na urychlení kompresoru na požadovanou rychlost. Tím snižuje prodlevu reakce turbodmychadla a zlepšuje řiditelnost. Ve vysokých otáčkách spalovacího motoru, kdy je energie proudu výfukových plynů přebytek, se místo otevření odtokového ventilu, pro zamezení příliš velkých otáček hřídele turbodmychadla, použije vysokootáčkový stroj jako generátor a odebere přebytečnou energii. [1]

2.1.2 Setrvačnickový akumulátor

Setrvačnickové akumulátory pracují na principu uložení energie do rotujícího setrvačníku a jeho zpětné přeměně na užitečnou energii. Tradiční setrvačnickové akumulátory rotují malou rychlostí, tudíž mají velký průměr a malou hustotu energie. Díky využití vysokootáčkového motoru je možné, aby setrvačník rotoval větší rychlostí, a tak měl menší průměr.

Pro aplikace požadující velký krátkodobý výkon mají vysokootáčkové akumulátory mnoho výhod oproti bateriovým akumulátorům. Jsou kompaktnější, mají větší efektivitu, životnost a větší rozsah pracovních teplot. Využití tohoto akumulátoru je například u závodních hybridních aut. [1]

2.1.3 Vysokootáčkové vřeteno

Další využití vysokootáčkových strojů je v oblasti obráběcích strojů. Konvenční nízkonákladová vysokootáčková vřetena využívají k provozu hnací řemen, ten však limituje maximální možné pracovní otáčky. Zvyšující se poptávka po vyšších otáčkách, řízení otáček, nízkých vibracích a vysoké hustotě výkonu vedou k využití vysokootáčkových strojů pro pohon vřeten. Výkony a otáčky v těchto aplikacích se pohybují od 9000 až do 300 000 otáček za minutu a výkonem od 1 do 24 kW. [1]

2.2 Materiály

Tato kapitola dává přehled o materiálech vhodných pro konstrukci vysokootáčkových strojů.

2.2.1 Elektrotechnické oceli

Pro konstrukci statoru a rotoru se využívají různé materiály ze slitiny železo-křemík (SiFe) a železo-kobalt (CoFe). CoFe má vyšší saturační magnetizaci, tudíž umožňuje dosažení vyšší hustoty výkonu. Hodnota saturační magnetizace závisí na technologii žíhání, době žíhání, teplotě a použité atmosféře. Obecně platí, že čím lepší jsou mechanické vlastnosti žíhaného materiálu, tím horší je saturační magnetizace. I při žíhání na optimální mechanické vlastnosti má CoFe asi o 20% vyšší saturační magnetizaci. Zároveň je však značně dražší než SiFe a zlepšení hustoty výkonu není tak markantní, aby byl výrazněji využíván na systémové úrovni.

Dalším důležitým faktorem pro výběr železa statoru a rotoru pro vysokootáčkové stroje je velikost měrných ztrát v železe. Ty jsou kvůli vysoké pracovní frekvenci velké a musí se snižovat menší tloušťkou plechů a žíhací metodou. Komerčně dostupné jsou plechy až o tloušťce 0,1 mm speciálně vytvořené pro vysokofrekvenční aplikace.

Se snižující se tloušťkou plechů se taktéž snižuje mez kluzu. U SiFe plechů M270-35A a M235-35A o tloušťce 0,35 mm dosahuje mez kluzu 350 MPa a 450 MPa. U tenčích plechů, vhodnějších pro vysoké frekvence, jako jsou NO10 a Arnon7 o tloušťce 0,1 mm, respektive 0,17 mm, je mez kluzu typicky 300-380 MPa.

Zvyšující se požadavky na oceli zapříčinily v poslední době vývoj nových materiálů. Jedním z příkladů je ocel 10JNEX. Ta má tloušťku 0,1 mm a asi 50% měrné ztráty oproti jiným vysokofrekvenčním ocelím. Toho bylo dosaženo jednak malou tloušťkou a jednak vysokým podílem křemíku, 6,5 %. Takto vysoký podíl křemíku zlepšuje magnetické vlastnosti, avšak zapříčiňuje tvrdnutí a tím je ocel nepraktická na výrobu. Tento problém byl však odstraněn zavedením nových chemických procesů do výroby. Vysoký obsah křemíku rovněž zvyšuje mez kluzu, ale ocel je zároveň křehčí, což ji dělá nevhodnou pro vysokootáčkové rotory. CoFe oceli mají nižší ztráty, zároveň však nižší mez kluzu a větší křehkost. Opět platí, že se s lepšími mechanickými vlastnostmi zhoršují magnetické. [1]

2.2.2 Slitiny mědi

V případě vysokootáčkových asynchronních motorů vyžaduje zvýšenou pozornost výběr materiálu rotorových tyčí a zkratovacích kruhů. Musejí vydržet vysokou obvodovou rychlost. Tudíž je u nich vyžadována vysoká mez kluzu a to i při vysokých teplotách. Tyče rovněž zvyšují tuhost rotorového svazku a tím i kritickou rychlost stroje.

Čistá měď tyto požadavky nesplňuje. Má malou mez kluzu a při vyšších teplotách měkne. Tudíž pro klece vysokootáčkových asynchronních motorů se využívají slitiny CuZr, CuBe a CuAl₂O₃. [1]

2.2.3 Permanentní magnety

Ve vysokootáčkových strojích se používají převážně magnety s vysokou hustotou energie na bázi NdFeB a SmCo s vysokou pracovní teplotou. NdFeB s příměsí dysprosia mohou mít pracovní teplotu až 250°C. Magnety ze Sm₂Co₁₇ mohou mít pracovní teplotu až 350°C.

Permanentní magnety vysokootáčkových strojů jsou namáhány jak mechanicky, tak rovněž ztrátami v nich generovaných. Tyto ztráty jsou výsledkem působení pulzací magnetického toku vznikajících drážkováním statoru, harmonickými ve vzduchové mezeře a asynchronními poli vznikajících vyššími harmonickými v napájení. Pro

redukci ztrát je možné použít segmentované magnety. Rovněž je nutné omezit ztráty a tím i teplotu magnetu návrhem vhodné geometrie a vinutí stroje.

Pro stínění magnetu před asynchronními poli se používá objímka z elektricky vodivého materiálu. Ta rovněž zajišťuje mechanickou pevnost rotoru tím, že drží magnety uvnitř svého objemu. [1]

2.3 Technologie vysokootáčkových strojů

2.3.1 Asynchronní motory

Asynchronní motory jsou díky své robustní konstrukci běžně používané pro vysokootáčkové aplikace. Většina aplikací s vysokootáčkovými asynchronními motory se pohybuje s výkony v řádu desítek kilowattů a otáčkami do 100 000 otáček za minutu.

2.3.1.1 Hladký plný rotor

Pro největší obvodové rychlosti je preferovaná varianta s plným rotorem, díky mechanické robustnosti takové topologie. Hladký plný rotor je konstrukčně nejjednodušší a mechanicky nejvíce odolný, zároveň však postrádá vysoko vodivostní cestu pro indukované rotorové proudy a je kvůli tomu neefektivní. Vyšší harmonické magnetického toku se soustředí na povrchu rotoru a tím způsobují značné ztráty. Zároveň se tyto vířivé proudy snaží vytlačit magnetické pole mimo rotor. [1]

2.3.1.2 Axiálně drážkovaný plný rotor

Drážkováním plného rotoru je dosaženo zvýšení impedance pro povrchové vířivé proudy. Zároveň však drážkování zvyšuje ztráty třením vzduchu, což při vysokých rychlostech může dokonce převýšit redukci ztrát vířivými proudy. Při návrhu rotoru je nutné najít kompromis v hloubce drážkování mezi potlačením vířivých ztrát a snížením mechanické odolnosti. Počet drážek rotoru by měl být sudým číslem, je tak omezeno zvlnění momentu a rotorových ztrát za cenu zvýšení nevyváženého magnetického tahu. [1]

2.3.1.3 Plný rotor s povrchovou vrstvou

Další zlepšení oproti hladkému plnému rotoru je dosaženo pokrytím jeho povrchu měděnou vrstvou. Tato povrchová vrstva představuje nekonečný počet rotorových tyčí zkratovacích kruhů. Takováto konstrukce představuje mechanicky robustní strukturu a dosahuje vyšší efektivity než jednoduchý plný rotor. Nevýhoda tohoto řešení spočívá v tom, že měděná vrstva představuje z magnetického hlediska zvětšení vzduchové mezery, tudíž je proti jiným variantám konstrukce horší účinník. [1]

2.3.1.4 Rotor s klecí nakrátko

Použitím topologie rotoru s klecí nakrátko je možné kombinovat mechanickou odolnost pevného rotoru a elektromagnetické vlastnosti klece nakrátko. Zároveň je možné, pokud to mechanická odolnost dovolí, použití rotoru složeného z plechů, což zvýší účinnost motoru. Materiál tyčí a zkratovacích kruhů je nutné vybírat s ohledem na mechanické namáhání. [1]

2.3.2 Stroje s permanentními magnety

V konstrukci strojů s permanentními magnety se často využívá vsazení magnetu do kovové objímky, nebo duté hřídele. Na výrobu objímky se používají vysokopevnostní kovové materiály jako titan nebo Inconel. Rovněž se používají uhlíková vlákna.

Pro potlačení zvlnění momentu a snížení vířivých ztrát v magnetu a objímce vlivem drážkování statoru, je vhodné při návrhu použít velkou vzduchovou mezeru, popřípadě je přímo eliminovat použitím bezdrážkového statoru.

Vysokootáčkové motory a generátory se většinou navrhují pro výkony v řádu jednotek až desítek kilowattů a otáčkami v řádu desítek až stovek tisíc otáček za minutu. V literatuře je možné nalézt i motor s otáčkami 500000 otáček za minutu. [1]

2.3.2.1 Bezdrážkové vinutí

Statorové drážky způsobují zvlnění magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Díky absenci těchto drážek není ve vzduchové mezeře toto zvlnění přítomno, díky

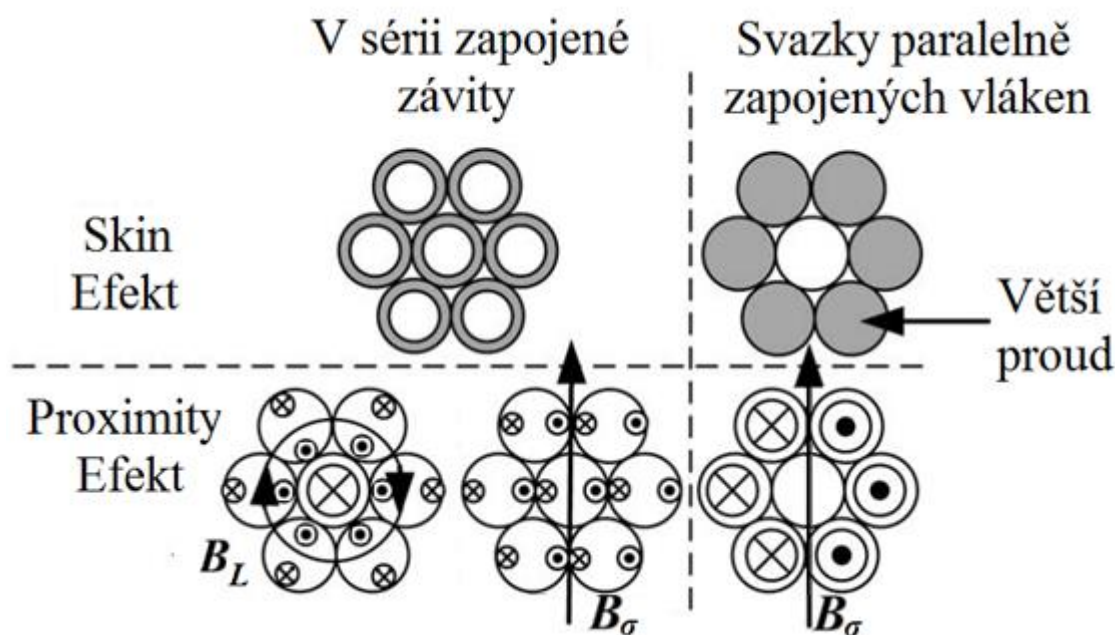
čemuž je potlačen reluktanční moment. Dále je možné lepší chlazení vinutí, protože tepelný tok nemusí procházet přes železo statoru a může být odveden přímo vzduchem přítomným ve vzduchové mezeře. Absence drážek rovněž znamená velkou vzduchovou mezeru a tím malou indukčnost takového stroje. [2]

2.3.3 Spínaný reluktanční motor

Spínané reluktanční motory se ve vysokootáčkových aplikacích používají okrajově. Jedno z jejich běžnějších využití je pro vysavače. Zejména kvůli jejich levné produkci a jednoduché konstrukci. [1]

3 SKIN A PROXIMITY EFEKT

Střídavý proud procházející vodičem vytváří střídavé magnetické pole. Toto pole indukuje ve vodiči vířivé proudy, které působí proti změně pole, které je vyvolává. Výsledná proudová hustota ve vodiči pak dosahuje vyšších hodnot na okraji vodiče a ve středu vodiče je menší. Tento jev se nazývá skin efekt, nebo také povrchový jev. Pokud vířivé proudy způsobuje střídavé magnetické pole vyvolané okolními vodiči nebo jiným zdrojem, nazývá se tento jev proximity efekt, jev blízkosti.



Obr. 3-1: Skin a proximity efekt [5]

3.1 Hloubka vniku

Hloubka vniku udává vzdálenost, kdy vnikem skin efektu dosahuje pokles proudové hustoty ve vodiči hodnoty $J = J_0 \cdot 1/e$. Pokud je průměr vodiče dostatečně menší než hloubka vniku, je proudová hustota ve vodiči za konstantní a skin efekt se v něm neprojevuje.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \pi f}} \quad (3-1)$$

, kde ρ je měrný odpor vodiče, μ je permeabilita vodiče a f je frekvence

Z předchozího vzorce je patrné, že hloubka vniku závisí na frekvenci. V tabulce 1 jsou uvedené hodnoty hloubky vniku pro vybrané frekvence.

f [Hz]	δ [mm]
50	9,35
500	2,96
2000	1,48
5000	0,93

Tabulka 3-1: Hloubka vniku mědi pro vybrané frekvence

Ztráty ve vinutí tvoří u točivých elektrických strojů velkou část celkových ztrát. Pro jejich redukci je třeba navrhnout vodiče vinutí s malým odporem, tudíž velkým průřezem. Pro odpor vinutí při napájení stejnosměrným proudem platí, že při zvětšení průřezu vodičů vinutí klesá. Pokud je vinutí napájeno střídavým proudem, začne vlivem skin a proximity efektu od určitého průřezu vodičů jeho odpor narůstat. Minimum střídavého odporu přibližně nastává, pokud je průměr vodiče stejného řádu jako hloubka vniku. [3]

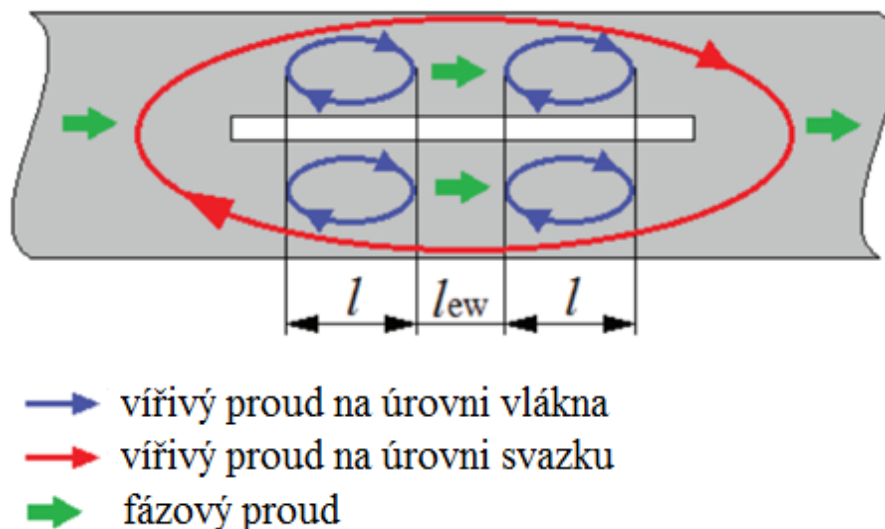
Pro vysokootáčkové stroje s napájecí frekvencí v řádu kHz, kterými se tato práce zabývá, je proto výhodné místo jednoho vodiče velkého průřezu, použít vodič složený z paralelně zapojených vláken malého průřezu. [4]

3.2 Vodič složený z paralelních vláken

Použití tohoto vodiče redukuje vliv skin a proximity efektu a činí vodič více mechanicky flexibilním. Pro ještě větší zlepšení mechanické flexibility je možné rozdělit vlákna do samostatných svazků, která je možno kroutit stejně jako vlákna samotná. Střídavý odpor vodiče složeného z paralelních vláken ovlivněn těmito jevy:

- 1) Skin efekt v jednotlivých vláknech svazku
- 2) Skin efekt celého svazku
- 3) Proximity efekt mezi jednotlivými vlákny
- 4) Proximity efekt způsobený externím polem

Tyto jevy je možné považovat za na sobě nezávislé. [7]



Obr. 3-2: Proudý ve svazku paralelních vodičů [6]

Problém použití vodiče tvořeného paralelními vlákny spočívá v tom, že do smyčky, které vytváří libovolné dvě vlákna se indukují svazkové proudy. Tudiž, při vyšších pracovních frekvencích vznikají tímto značně narůstají ztráty, jak je vidět na obrázku 3-4. [6]

3.2.1 Kroucený vodič

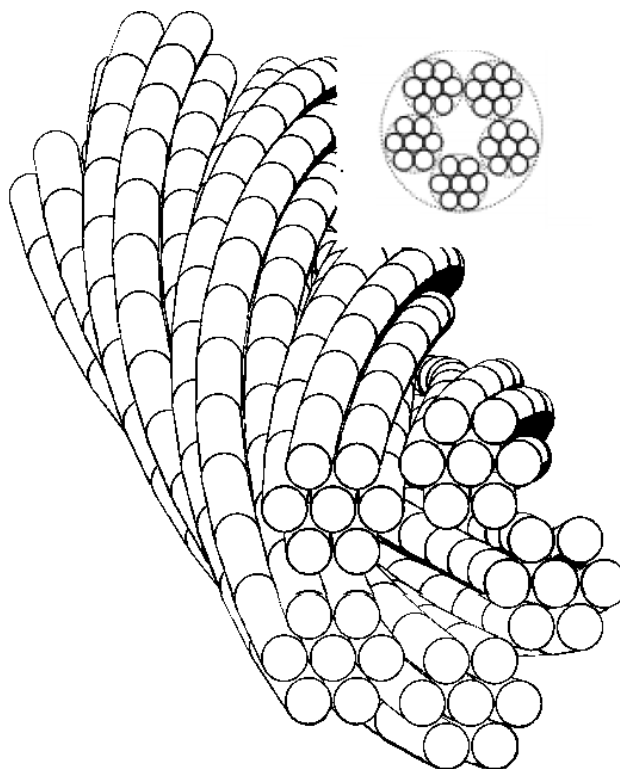
Kroucený vodič je konstruován tak, že každé vlákno jeho svazku má spirálovitý tvar s konstantní vzdáleností od středu svazku. Cíl kroucení je v tom, snížit plochu smyčky, kterou prochází magnetický tok. Tím je docíleno snížení ztrát vlivem proximity efektu. U takového řešení však nedochází k potlačení vlivu skin efektu. [7]

3.2.2 Vodič typu Litz

Svazek vodiče tohoto typu je vyroben tak, že každé jeho vlákno střídavě prochází všemi pozicemi v průřezu svazku a je od ostatních vláken izolováno. Tím je potlačen jak proximity efekt, tak také skin efekt. Je dosaženo více rovnoměrné rozložení proudové hustoty ve svazku. [7]

3.3 Vliv konstrukce vodiče na ztráty vířivými proudy

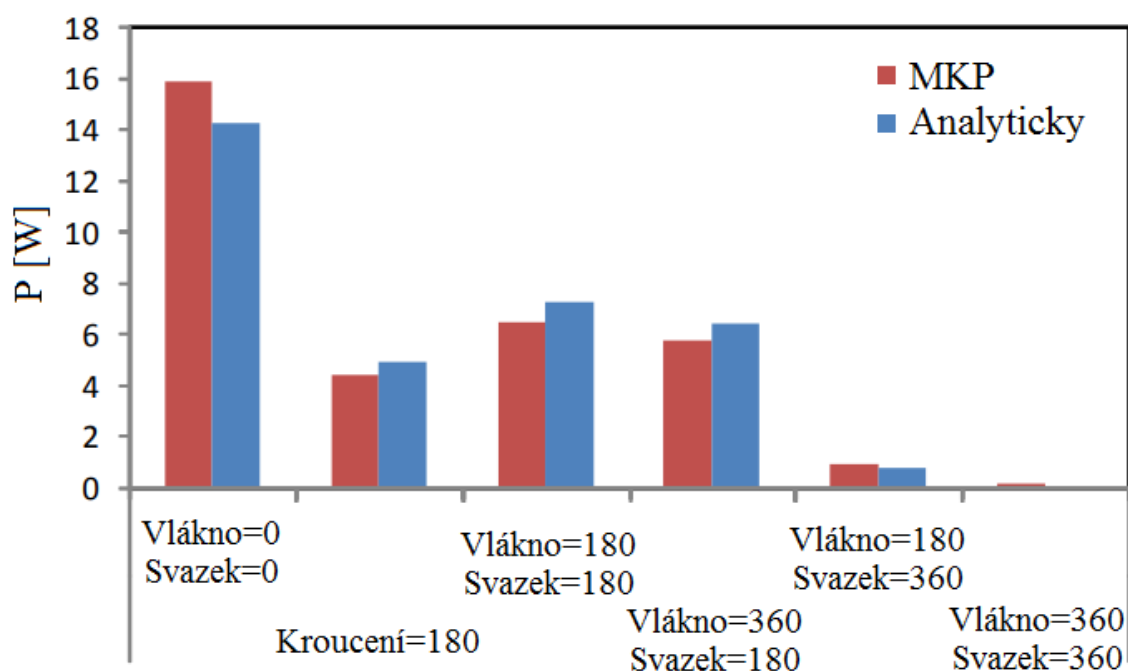
3.3.1 Svazkové vířivé proudy



Obr. 3-3: Vodič typu Litz [8]

Obrázek 3-3 ukazuje vodič typu Litz tvořeného pěti svazky transponovanými o 180° se sedmi vlákny transponovanými o 180° za celou délku vodiče. Tento vodič s dalšími variantami transpozic svazků byl analyzován na potlačení ztrát způsobených svazkovými vířivými v literatuře [8] a bylo provedeno srovnání s vodičem s přímými paralelními vlákny a krouceným vodičem. Analýza byla provedena metodou konečných prvků a analytickým výpočtem. [8]

Výsledky analýzy jsou zobrazeny na obrázku 3-4. Při porovnání ztrát je vidět, že největší ztráty jsou při použití vodiče z přímých paralelních vláken. Při úplné transpozici jak vláken, tak svazků jsou svazkové vířivé proudy a jejich ztráty značně potlačeny. [8]



Obr. 3-4: Porovnání ztrát způsobených svazkovými vířivými proudy [8]

3.3.2 Vířivé proudy ve vláknu

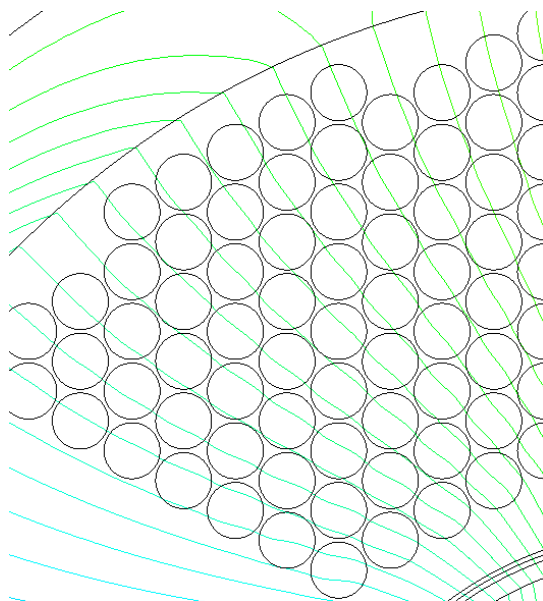
Vířivé proudy ve vláknu vodiče vznikají nezávisle na kroucení vláken, či svazků jejichž jsou součástí. Dle [9] jsou ztráty ve vlákně kromě jeho materiálu závislé na změně magnetické indukce ve vlákně a průměru vlákna. Tyto ztráty lze tudíž potlačit použitím vodiče složeného z dostatečně tenkých vláken, který bude vystaven co nejmenší změně magnetické indukce.

3.4 Vnější magnetické pole působící na vinutí

Jak již bylo naznačeno na obrázku 3-1, proximity efekt způsobují magnetická pole vyvolaná okolními vodiči a vnějšími zdroji. Vnější zdroje můžeme rozdělit na magnetická pole vzniklá vlivem magnetizačního toku a rozptylového toku drážky. Magnetická pole vyvolaná vnějšími zdroji dosahují mimo délku stroje velmi malých hodnot. Tím pádem je možné vliv polí z vnějších zdrojů na konce vinutí zanedbat.

3.4.1 Proximity efekt způsobený magnetizačním tokem

Magnetizační tok prochází vodiči vinutí především u strojů bez statorových drážek. Na obrázku 3-5 jsou zobrazeny vodiče takového stroje. Jak je zde vidět, prochází tento tok přímo skrz vinutí a magnetická indukce ve vodičích může dosahovat poměrně vysokých hodnot. U strojů s drážkami je tento tok směřován zuby statoru dále do jha, a pokud zuby nejsou přesyceny, vodiči vinutí prochází tok o zanedbatelně malé velikosti. To je vidět na obrázku 3-6.



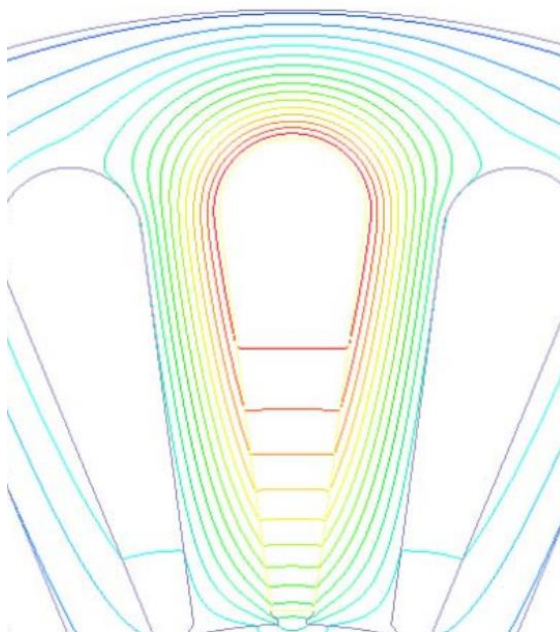
Obr. 3-5: Magnetizační tok procházející bezdrážkovým vinutím

3.4.2 Proximity efekt způsobený rozptylovým tokem drážky

Rozptylovým tokem drážky je myšlen tok, který nesměruje ze zuby do vzduchové mezery nebo opačným směrem, ale směruje do vedlejšího zuby. Tudiž tento tok vzniká pouze u strojů s drážkami. Nejvyšších hodnot dosahuje tento tok v oblasti otevření zuby, kde je vzdálenost zubů od sebe nejmenší.

Snížení ztrát způsobených tímto tokem je diskutováno v [4]. Výchozí stroj měl výkon 10 kW, elektrickou frekvenci 1,8 kHz a vinutí tvořeno vodiči typu Litz. Autor chtěl ukázat možnost použití vodičů tvořenými nekroucenými paralelními vlákny. Pro snížení ztrát zde bylo navrženo pouze částečné zaplnění drážek vinutím. Tímto jsou vodiče vinutí vystaveny výrazně nižší hodnotě změny magnetické indukce, proximity efekt je značně potlačen a ztráty jsou tím nižší. Jako nejlepší řešení se

ukázalo zaplnit drážky z poloviny. Použitím vodiče z nekroucených paralelních vláken, který má vyšší plnění mědi než Litz, bylo dosaženo stejné celkové plochy mědi i při nezaplnění celé drážky. Dále byly oproti výchozímu stroji rozšířeny zuby, čímž se snížily ztráty v železe. Výsledný upravený stroj měl ztráty v mědi 1,4 vyšší než výchozí stroj. Toto zvýšení ztrát však bylo kompenzováno sníženými ztrátami v železe. Výsledný stroj tedy ve výsledku dosahoval stejných jmenovitých parametrů jako výchozí stroj i bez použití vodiče typu Litz. [4]



Obr. 3-6: Rozptylový tok statorové drážky [10]

4 NÁVRH POTLAČENÍ VLIVU SKIN A PROXIMITY EFEKTU V KONKRÉTNÍM STROJI

4.1 Parametry optimalizovaného stroje

Možnosti potlačení vlivu skin a proximity efektu bude demonstrováno na navrhovaném stroji, synchronním generátoru s permanentními magnety. Ten by měl dosahovat jmenovitého výkonu 3 kW při 230 000 otáčkách za minutu. Další parametry stroje jsou vypsány v tabulce 4-1.

Materiál železa statoru byl zvolen plech NO10. Je to plech speciálně určený pro vysokofrekvenční aplikace. Díky tloušťce 0,1 mm potlačuje vířivé proudy, které by jinak byly při větší tloušťce plechu a dané pracovní frekvenci značné.

Použitý permanentní magnet je N52M, vysokoenergetický na bázi NdFeB. Ten je zasazen v titanové objímce, která zajišťuje jejich stínění před vysokofrekvenčními magnetickými poli a mechanicky magnet zajišťuje. Délka titanové objímky je větší než délka magnetického obvodu, součástí této prodloužené části je turbínka, která generátor pohání.

Stroj bude navrhován ve dvou variantách, jako bezdrážkový a jako stroj s drážkami.

Parametry stroje:

Jmenovitý výkon	3000 W
Jmenovité otáčky	230 000 min ⁻¹
Jmenovité fázové napětí	230 V
Počet pólů	2
Počet fází	3

4.2 Parametry simulace

Návrh stroje a vliv jednotlivých úprav bude ověřován v simulačním programu Ansys Maxwell. Stroj bude simulován jako 2D transientní úloha. Velikost kroku analýzy je zvolena 2,6 μs. Během jednoho kroku udělá rotor stroje setinu otáčky.

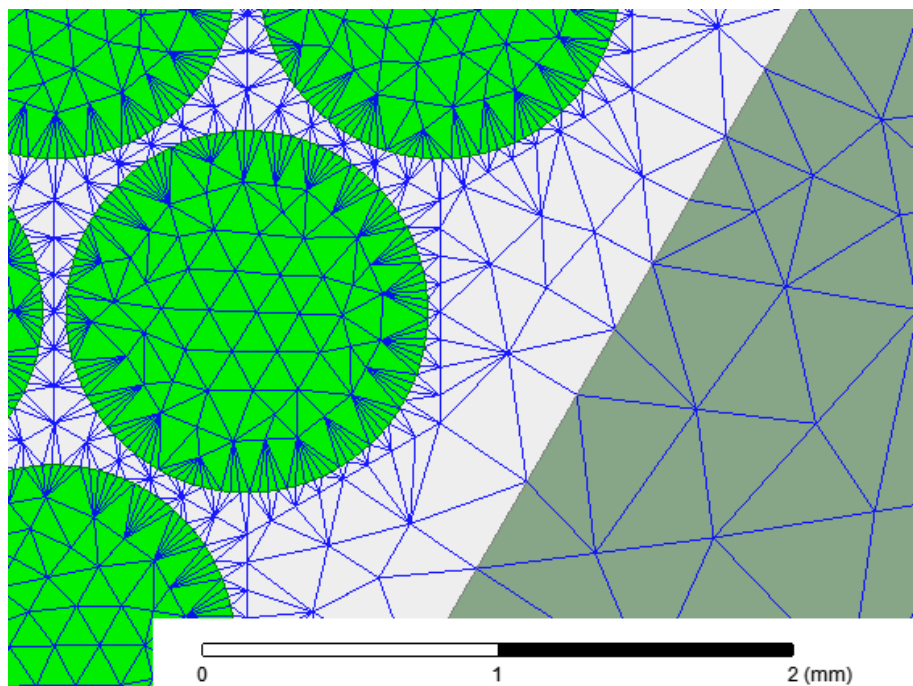
Takový krok je kompromisem mezi přesností výpočtů a rychlostí výpočtů a měl by být dostatečně malý.

Jelikož je simulace koncipována jako 2D úloha, je nutno zahrnout odpor a indukčnost konců vinutí do elektrického obvodového modelu. Ke ztrátám ve vinutí vypočtených simulací je nutno přičíst ztráty vzniklé na tomto odporu konců vinutí.

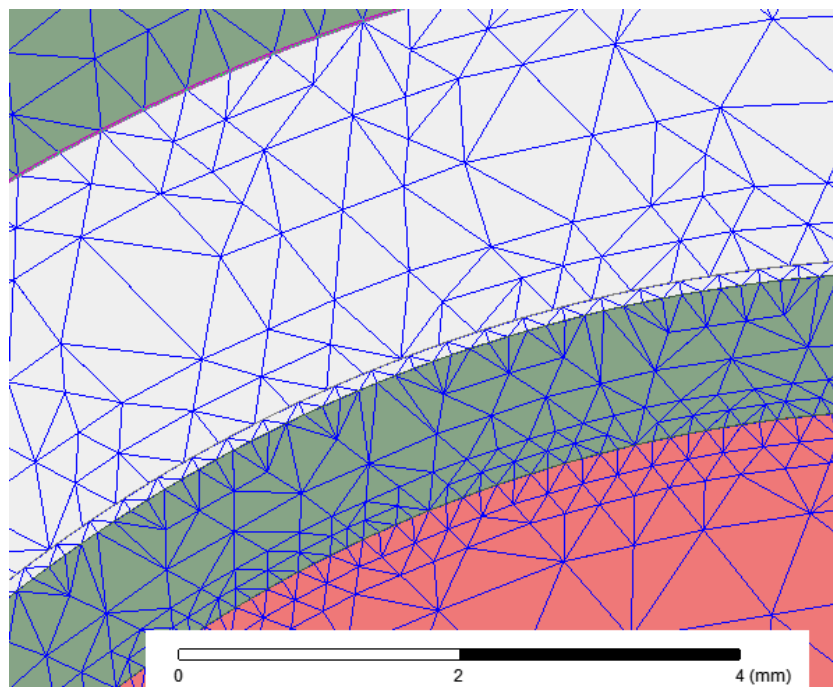
Výpočet ztrát v titanové objímce je zatížen chybou danou tím, že úloha je řešena jako 2D. Vířivé proudy tekoucí objímkou se dle modelu uzavírají přes nulový odpor. Ve skutečnosti je tento odpor nenulový a vznikají na něm další ztráty. Avšak tento odpor rovněž snižuje velikost vířivých proudů, čímž celkové ztráty v objímce klesají a chyby se tím částečně kompenzují. Dá se tudíž předpokládat, že ztráty vypočtené simulací svojí velikostí odpovídají reálným ztrátám.

4.2.1 Zvolená síť v simulaci

Důležitá podmínka přesnosti výsledků simulace je dostatečně jemná síť bodů, ve kterých jsou fyzikální veličiny počítány. Jemnou síť je potřeba zvolit především v oblastech, kde se očekává výrazná změna některé fyzikální veličiny. To znamená především ve vodičích vinutí a titanové objímce, kde se výrazně mění proudová hustota vlivem vířivých proudů, ve vzduchové mezeře mezi statorem a rotorem a ve vzduchových mezerách mezi jednotlivými vodiči a mezi statorem a rotorem. Obrázky 4-1 a 4-2 zobrazují detaily sítě v těchto oblastech.



Obr. 4-1: Síť v oblasti vinutí



Obr. 4-2: Síť v oblasti vzduchové mezery

4.3 Postup optimalizace

První krok návrhu je vytvoření zjednodušeného modelu pro ověření správnosti magnetického obvodu a konfigurace vinutí. Vliv skin a proximity efektu je v tomto

kroku zanedbán a vinutí je modelováno jako plocha obsahující požadovaný počet vodičů.

V dalším kroku jsou vodiče vinutí modelovány každý zvlášť. Simulace již zahrnuje indukované vířivé proudy v každém vodiči a tím vliv skin a proximity efektu.

Simulace stroje jsou prováděny v motorickém režimu. Do jednotlivých fází je nuceno napětí odpovídající jmenovitému napětí a frekvenci stroje.

Výchozí návrh stroje je bez úprav nutných pro efektivní činnost stroje při takto vysokých otáčkách. Lze tedy očekávat, že v těchto výchozích strojích budou vznikat ve vinutí značné ztráty a stroje budou dosahovat velmi malé účinnosti. Tím bude demonstrován vliv skin efektu a proximity efektu na rozložení proudové hustoty a ztrát ve vodičích vinutí.

Následně budou tyto výchozí stroje optimalizovány dle poznatků získaných v kapitole 3 a podle výsledků simulací.

5 MODEL BEZDRÁŽKOVÉHO STROJE

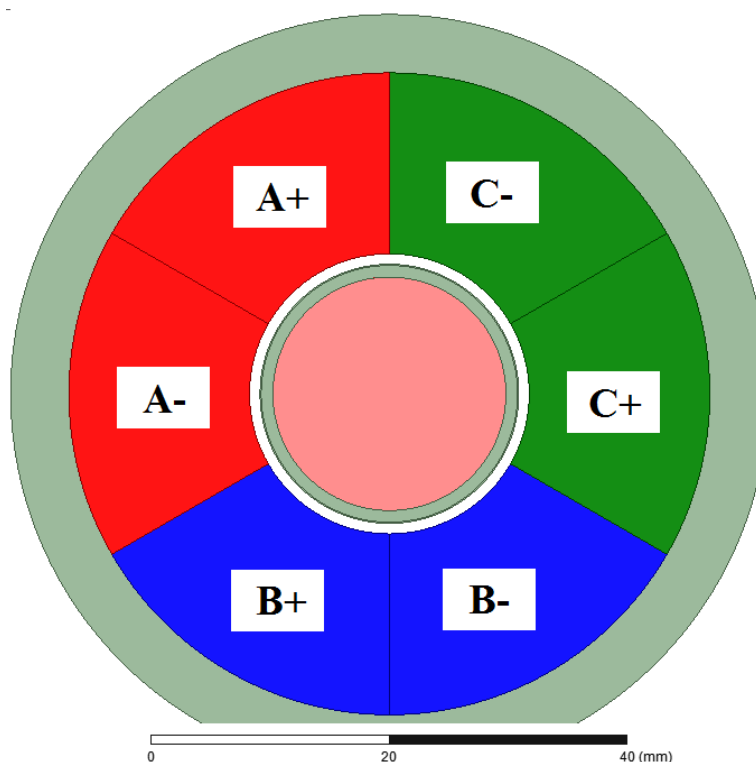
První varianta navrhovaného stroje obsahuje bezdrážkové soustředěné vinutí. Vinutí je navinuto na zuby z nemagnetického materiálu. Hlavní výhoda použití této varianty je v tom, že titanová objímka rotoru je vystavena pouze stejnosměrnému magnetickému poli permanentního magnetu a reakčnímu poli vinutí. Hlavní nevýhoda této varianty je vystavení vodičů vinutí magnetizačnímu poli, které způsobuje velmi výrazný proximity efekt.

5.1 Výchozí neoptimalizovaný návrh

V modelu neoptimalizovaného bezdrážkového stroje nejsou použita žádná opatření pro potlačení vlivu skin a proximity efektu na vodiče vinutí. Je v něm demonstrován jejich vliv a jeho výsledky jsou použity pro porovnání efektu jednotlivých změn, které budou následně provedeny.

5.1.1 Zjednodušený model

Na obrázku 5-1 je zobrazen zjednodušený výchozí model bezdrážkového stroje. Jednotlivé fáze jsou barevně odlišeny a popsány, permanentní magnet je od titanové objímky barevně odlišen. Ve zjednodušeném modelu stroje byla ověřena funkčnost následující konfigurace bezdrážkového stroje. Průměr rotoru je 22 mm. Tloušťka titanové objímky je 1 mm. Vnitřní průměr statoru je 55 mm a vnější 65 mm. Délka stroje je 30 mm. Počet závitů v jedné fázi je 80.



Obr. 5-1: Zjednodušený výchozí model bezdrážkového stroje

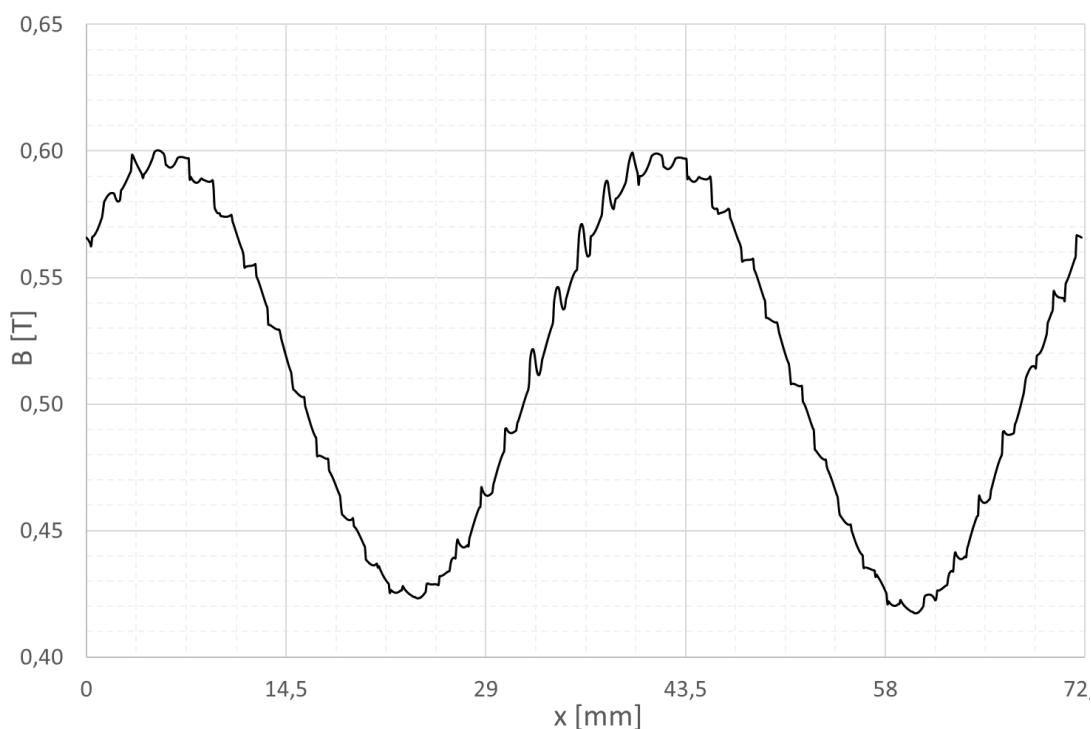
Ztráty v železe	ΔP_{Fe} [W]	56,1
Ztráty ve vinutí	ΔP_{Cu} [W]	187,0
Ztráty v rotoru	ΔP_{Rot} [W]	98,6
Výkon	P [W]	3033
Příkon	P_p [W]	3374
Účinnost	η [%]	89,9

Tabulka 5-1: Výsledky simulace zjednodušeného výchozího modelu

Tabulka 5-1 zobrazuje výsledky simulace zjednodušeného výchozího modelu. Jak již bylo řečeno, ve zjednodušeném modelu není pro vinutí simulován vliv skin a proximity efekt. Odpor vinutí je tudíž dán stejnosměrným odporem vinutí. Ten je tvořen z hlavní části čelem vinutí. Odhadnutá délka čela jednoho závitu je 150 mm, zatímco aktivní délka jednoho závitu je 60 mm. Ztráty v čele vinutí tedy tvoří v tomto modelu převážnou část ztrát ve vinutí.

Ztráty v rotoru jsou tvořeny ohmickými ztrátami v titanové objímce a v permanentním magnetu. Jsou dány vířivými proudy indukovanými vyššími

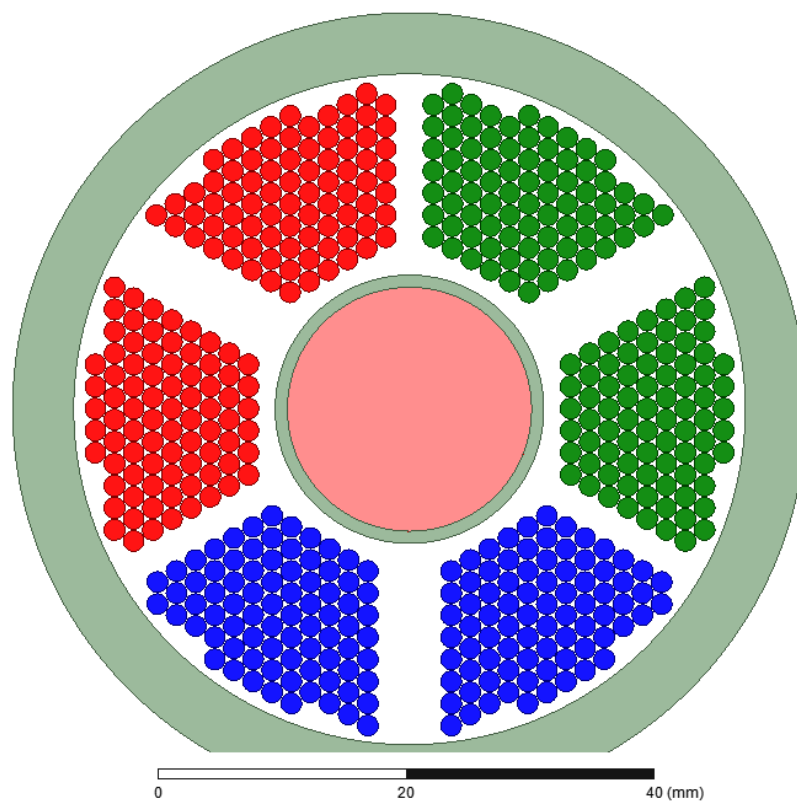
harmonickými magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Ty jsou nejspíš vyvolány reakčním polem vinutí. Obrázek 5-2 zobrazuje průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Vyšší harmonické jsou zde jasně patrné.



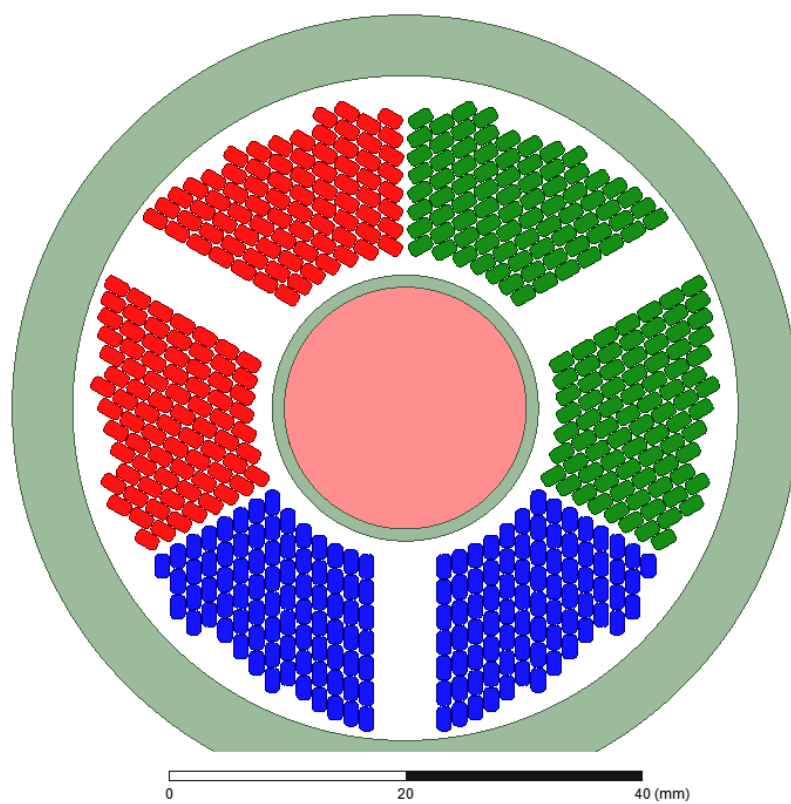
Obr. 5-2: Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře

5.1.2 Model s vlivem skin a proximity efektu

Na obrázku 5-3 je zobrazen model výchozího stroje s kulatými vodiči, na obrázku 5-4 s obdélníkovými. Pro jednoduchost konstrukce bezdrážkového vinutí bylo zvoleno řešení, kdy se vinutí navine na zuby z nemagnetického materiálu, které jsou přilepeny ke jhu statoru. Tyto zuby by neměly výrazně ovlivnit rozložení magnetické indukce, proto nejsou v modelu uvažovány a jsou nahrazeny vakuem. Vodiče vinutí pro model výchozího stroje byly použity jak kulaté, tak obdélníkové. Rozměry vodičů byly voleny dle standardně vyráběných vodičů. Byl zvolen kulatý vodič průměru 1,7 mm. a obdélníkový s rozměry 2x1,2 mm se zaoblením hran. Tyto rozměry jsou zvoleny jako největší, které lze do omezeného prostoru vzduchové mezery dostat. Celkový průřez mědi je pro oba typy vodičů téměř shodný, 181 mm^2 respektive $181,5 \text{ mm}^2$. Rozdíl je v mírně odlišném rozmístění jednotlivých vodičů.



Obr. 5-3: Výchozí model stroje s kulatými vodiči

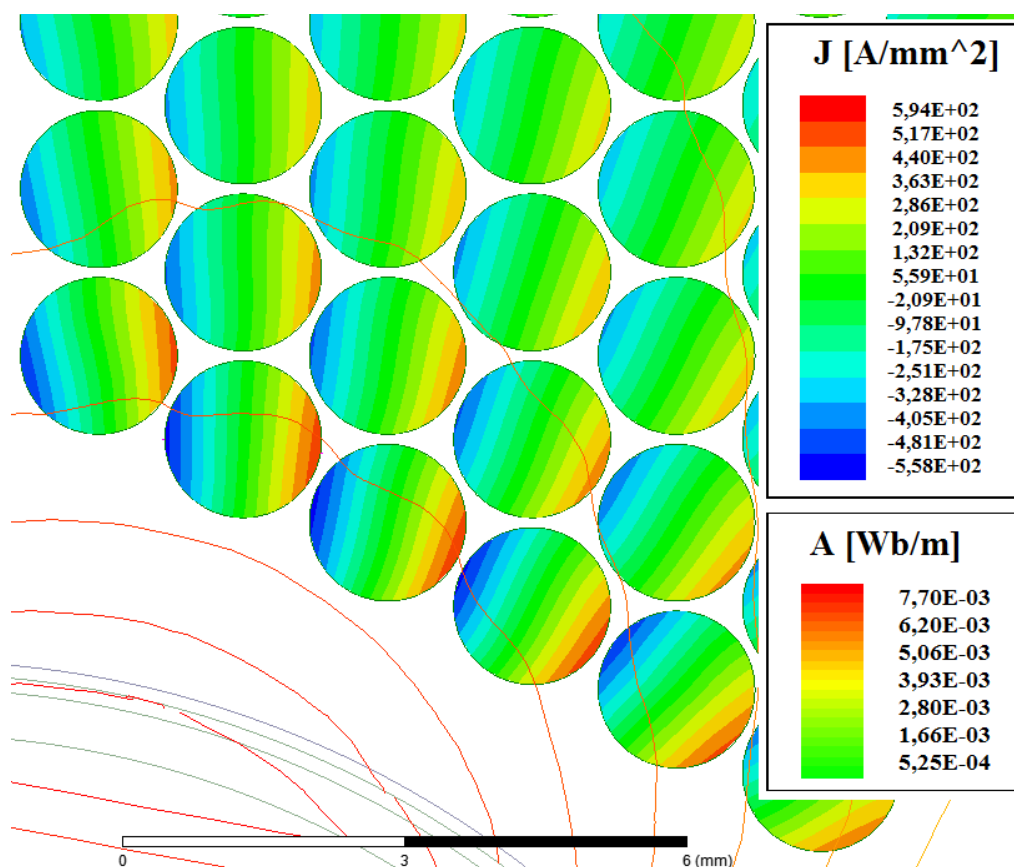


Obr. 5-4: Výchozí model stroje s obdélníkovými vodiči

		Kulaté vodiče	Obdélníkové vodiče
Ztráty v železe	P_{Fe} [W]	48,0	51,3
Ztráty ve vinutí	P_{Cu} [kW]	9,20	7,95
Výkon	P [kW]	3,12	3,19
Příkon	P_p [kW]	12,37	11,25
Účinnost	η [%]	25,2	28,4

Tabulka 5-2: Výsledky simulace výchozího modelu

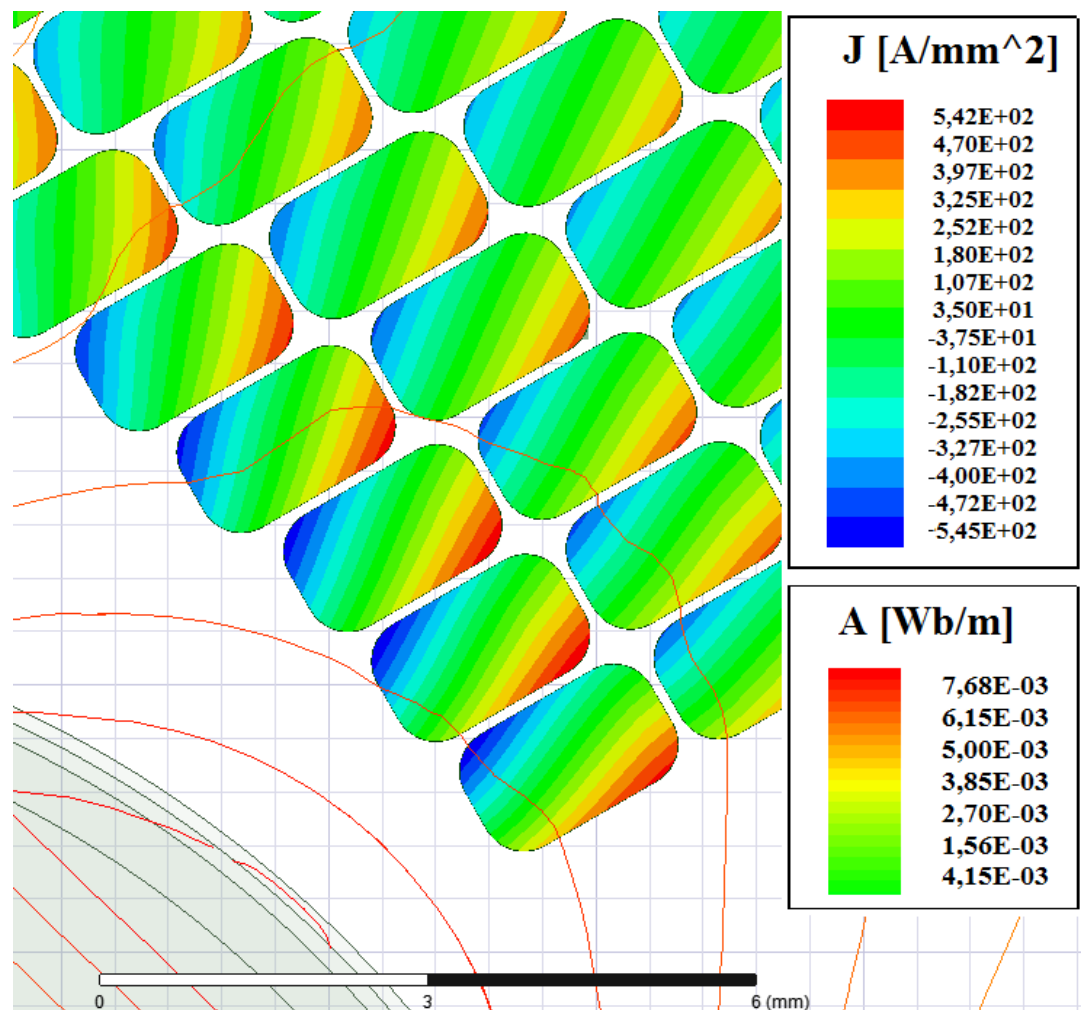
Tabulka 5-2 zobrazuje výsledky simulace výchozího neoptimalizovaného modelu bezdrážkového stroje s kulatými a s obdélníkovými vodiči. Z výsledků je patrné, že v případě konstrukce takto navrhnutého stroje by ztráty vzhledem k fyzickým rozměrům stroje dosahovaly extrémních hodnot. Použité materiály by takovéto ztráty nesly. Proto je nutné provést úpravy pro redukci ztrát.



Obr. 5-5: Proudová hustota v kruhových vodičích výchozího modelu

Hloubka vniku pro napájecí frekvenci 3833,33 Hz je 1,07 mm. Tato hodnota je sice řádově stejná jako průměr vodiče, ale v rozložení proudové hustoty ve vodičích je patrné, že největší je ve vodičích blízko rotoru. Skin efekt způsobuje rozložení proudové hustoty stejné nezávisle na této vzdálenosti. Navíc je zřejmé, že proudová hustota není nejmenší uprostřed vodičů, ale na jednom okraji a směrem ke druhému se zmenšuje.

V oblasti nejbližší k rotoru jsou siločáry koncentrovány nejvíce. To spolu s vysokými otáčkami a velkými rozměry vodičů je důvodem velmi silného proximity efektu. Pro vodič kruhového průřezu je nejvyšší proudová hustota 495 A/mm², pro vodič obdélníkového 510 A/mm². Takto vysoké hodnoty proudové hustoty by vodič okamžitě roztavily. Obrázek 4-4 ukazuje proudovou hustotu při použití vodičů obdélníkového tvaru.



Obr. 5-6: Proudová hustota v obdélníkových vodičích výchozího modelu

Mírně menší ztráty při použití vodičů obdélníkového tvaru je způsobena jiným rozložením vodičů ve vinutí a jejich jinými rozměry. Ztráty v železe jsou v porovnání se ztrátami ve vinutí zanedbatelné. Z celkových ztrát ve vinutí a z lokální proudové hustoty ve vodičích je jasné, že je nutné provést změny ve vinutí pro zmenšení obou veličin.

5.1.3 Návrh změn pro zlepšení účinnosti výchozího stroje

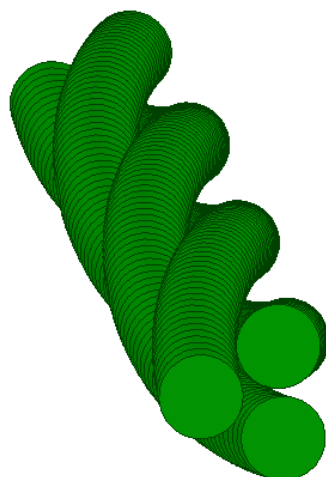
Pro zmenšení ztrát ve vinutí je nutné potlačit především proximity efekt, skin efekt má, v tomto případě, vliv menší. Nejvhodnější opatření je použití vodičů typu Litz. Jelikož je proximity efekt velmi silný, bude nutno použít velký počet paralelních vláken o velmi malém průměru. Použitím vláken s malým průřezem se rovněž potlačí vliv skin efektu.

Použití vodičů s paralelními vlákny jiného typu než Litz nemá vzhledem k vzniklým svazkovým proudům smysl.

Největší změna magnetické indukce a tím i vliv proximity efektu je u vodičů v těsné blízkosti rotoru. Pro co nejmenší rozptylový tok je však nutné vodiče co nejbližší rotoru, takže řešení umístěním vodičů dále od rotoru není možné.

5.2 Upravený návrh s vodičem typu Litz

Pro snížení vlivu skin a proximity efektu byl model upraven, vodič typu Litz nahradil výchozí kulaté a obdélníkové vodiče. Pro modelování vodiče typu Litz je nutné vytvořit 3D model. Pro první návrh byl použit vodič typu Litz o třech paralelních vláknech každé o průměru 0,75 mm. Tento průměr je pro potlačení proximity efektu moc velký, ale je tak možné ověřit správnost a realizovatelnost simulace. Litz je plně transponován, každé vlákno projde všemi body vodiče během jedné aktivní délky stroje. Jiné parametry stroje zůstávají stejné jako u výchozího modelu.



Obr. 5-7: Vodič typu Litz se třemi paralelními vlákny

Na obrázku 5-7 je zobrazen vodič typu Litz tvořen třemi paralelními vlákny použitý v modelu. Vzhledem ke kroucení jednotlivých vláken je vytvořená síť nutná pro správnou simulaci skin a proximity efektu tvořena velkým počtem prvků. Jelikož je počet závitů 80, je nutné modelovat obě strany cívky a vinutí je třífázové, je počet takovýchto vodičů v modelu 480. Jak již bylo řečeno, je každý vodič tvořen třemi vlákny, tudíž je celkový počet vláken v modelu 1440. Jak je z daných čísel patrné, technické nároky na výpočet simulace jsou extrémní a vzhledem k dostupným technickým prostředkům nebyl výpočet úspěšný.

Jak je vidět na obrázku 5-5 a 5-6, na proximity efekt ve vodiči má vliv jeho umístění v prostoru, jeho fyzické rozměry a okolní vodiče. Pro získání reálných výsledků tudíž není možné model pro uskutečnění výpočtů zjednodušit.

6 MODEL STROJE S DRÁŽKAMI

Druhý navrhovaný stroj má vinutí umístěné v drážkách. Zuby statoru koncentrují magnetizační tok stroje a vodiče vinutí tak budou vystaveny pouze rozptylovému toku, který je dán tvarem drážek, rozměry drážek a umístěním vodičů v těchto drážkách. Nežádoucí efekt způsobený drážkováním statoru je vznik vyšších harmonických magnetické indukce ve vzduchové mezeře, kvůli kterým vznikají ztráty v titanové objímce a v permanentním magnetu.

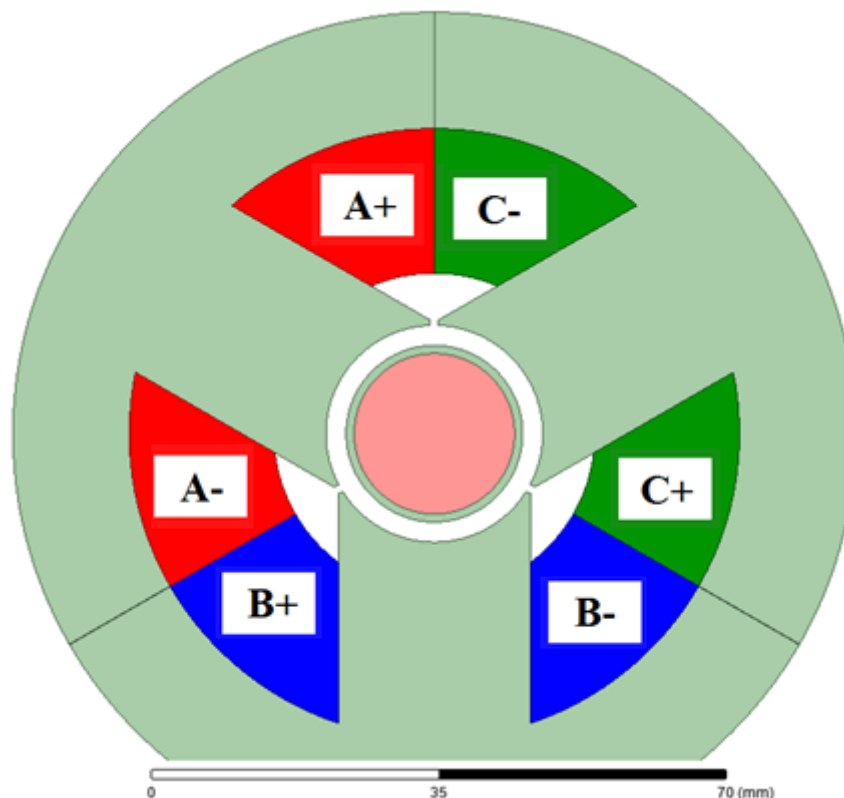
Rozměry jha a zubů statoru byly zvoleny tak, aby magnetická indukce v nich byla v lineární části BH křivky. Tím jsou omezeny ztráty v železe a rozptylový tok, který by procházel drážkou.

6.1 Výchozí neoptimalizovaný návrh

V modelu neoptimalizovaného stroje s drážkami nejsou použita žádná opatření pro potlačení vlivu skin a proximity efektu na vodiče vinutí. Je v něm demonstrován jejich vliv a výsledky z něj získané jsou použity pro porovnání efektu jednotlivých změn, které budou následně provedeny.

6.1.1 Zjednodušený model

Na obrázku 6-1 je zobrazen zjednodušený výchozí model stroje s drážkami. Stejně jako v kapitole 5 jsou jednotlivé fáze stroje pro názornost barevně odlišeny. Ve zjednodušeném modelu stroje byla modelována následující konfigurace stroje. Délka stroje je 10 mm. Kromě délky má rotor stejné rozměry jako u modelu v kapitole 5. Vnitřní průměr statoru je 76 mm a vnější 105 mm. Pro co nejnižší řád vyšší harmonické magnetické indukce ve vzduchové mezeře má stator 3 zuby, na které je navinuto soustředěné vinutí. Počet závitů v jedné fázi je 69. Zuby mají šířku 24 mm. Otevření drážek je 1,8 mm.



Obr. 6-1: Zjednodušený výchozí model stroje s drážkami

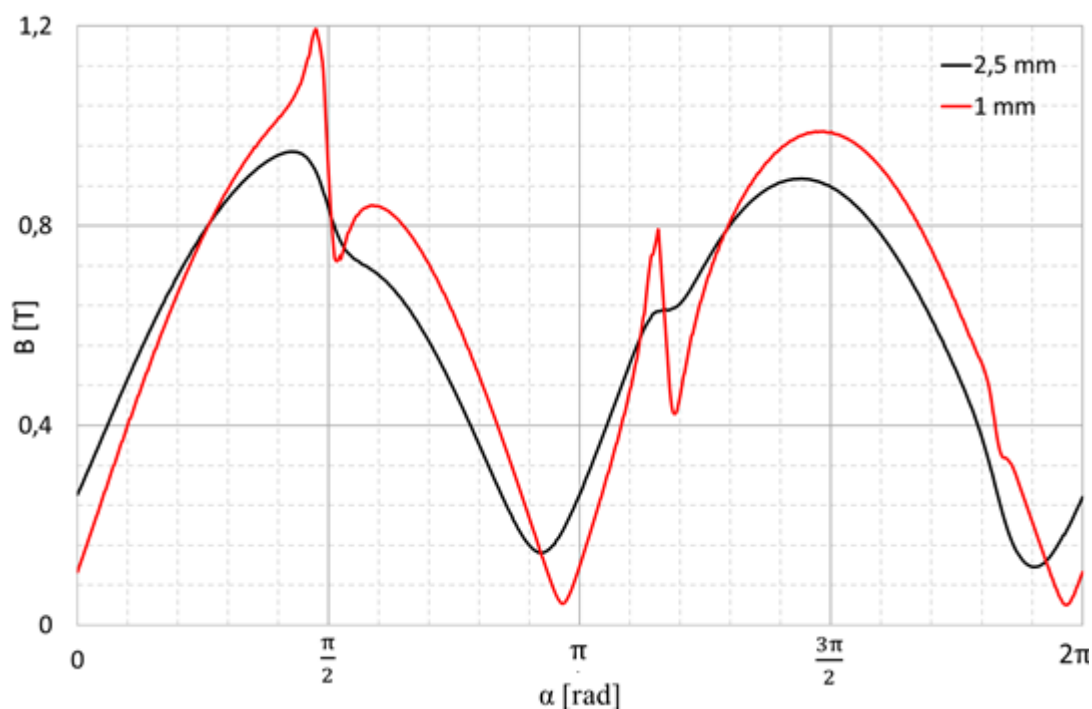
6.1.1.1 Vliv délky vzduchové mezery na ztráty v rotoru

Jak již bylo zmíněno, drážkování statoru způsobuje vznik vyšších harmonických v magnetické indukci vzduchové mezery, které indukují vířivé proudy v titanové objímce. Jeden ze způsobů omezení amplitudy těchto vyšších harmonických je zvětšení vzduchové mezery. Bylo vytvořeno několik modelů s různými délkami vzduchové mezery pro porovnání jejího vlivu na ztráty v rotoru. Jiné rozměry stroje byly stejné.

Tabulka 6-1 zobrazuje vliv délky vzduchové mezery na ztráty v rotoru. Při délce vzduchové mezery 2,5 mm jsou ztráty přibližně poloviční oproti délce mezery 1 mm. Pro výchozí model je proto zvolena délka mezery 2,5 mm. Jak je patrné z obrázku 6-1, delší vzduchová mezera by již zvětšovala otevření drážek, což je nežádoucí, proto byla maximální délka zvolena 2,5 mm.

δ [mm]	1,0	1,5	2,0	2,5
ΔP_{Rot} [W]	140,1	104,9	87,1	73,4

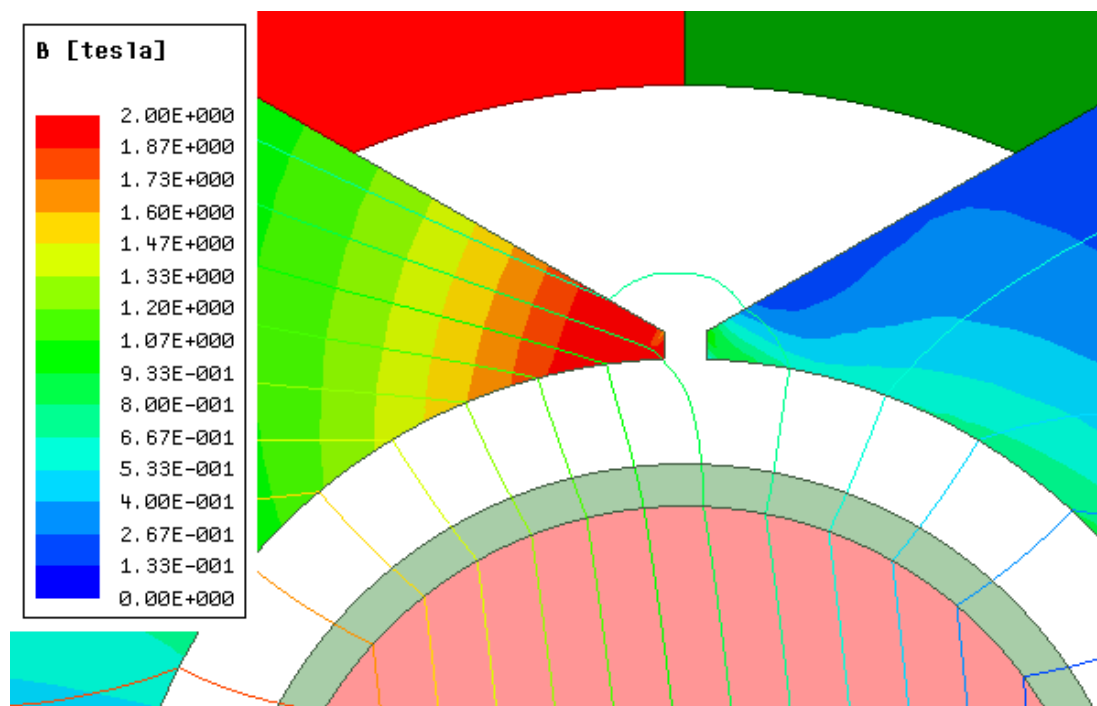
Tabulka 6-1: Vliv délky vzduchové mezery na ztráty v rotoru



Obr. 6-2: Průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře výchozího modelu

Obrázek 6-2 zobrazuje průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře 0,5 mm od titanové objímky zjednodušeného výchozího modelu pro délku vzduchové mezery 1 mm a 2,5 mm. Z grafu je patrné výrazné zvlnění průběhu při délce mezery 1 mm, špička indukce dosahuje až 1,2 T. Při délce mezery 2,5 mm je zvlnění značně potlačeno, díky tomu jsou ztráty v rotoru značně nižší. Po zhodnocení těchto výsledků byla zvolena délka vzduchové mezery pro další modely 2,5 mm.

Vliv na velikost vyšších harmonických magnetické indukce ve vzduchové mezeře má rovněž periodické přesycování zubů statoru v blízkosti otevření drážky. To ukazuje obrázek 6-3. Přesycení železa statoru snižuje jeho magnetickou vodivost v tomto místě. Vliv tohoto jevu na průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře lze přirovnat k periodickému zvětšování otevření drážky.



Obr. 6-3: Přesycený zub modelu se třemi drážkami

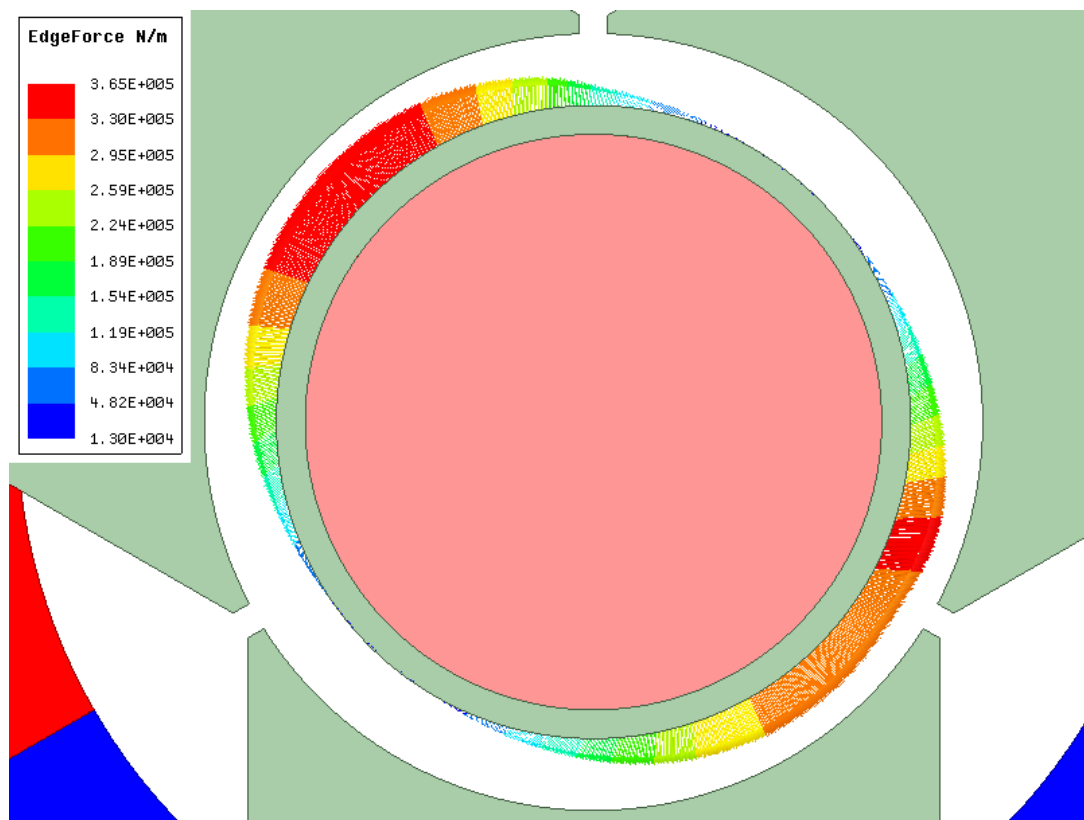
6.1.1.2 Výsledky simulace

Tabulka 6-2 zobrazuje výsledky simulace zjednodušeného výchozího modelu. Jak je z tabulky patrné, ztráty v rotoru představují značnou část celkových ztrát stroje. Jelikož se jedná o zjednodušený model, nebyl při výpočtu ztrát v aktivní části vinutí zahrnut vliv skin a proximity efektu. Odpor čel vinutí pro jednu fázi byl odhadnut na 1Ω se zahrnutím vlivu skin a proximity efektu. Proto představují většinu ztrát ve vinutí ztráty v čelech vinutí. Účinnost stroje bez započítání mechanických ztrát dosahuje 93,1 %.

Ztráty v železe	ΔP_{Fe} [W]	65,0
Ztráty ve vinutí	ΔP_{Cu} [W]	80,0
Ztráty v rotoru	ΔP_{Rot} [W]	73,4
Výkon	P [W]	2960,7
Příkon	P_p [W]	3170,1
Účinnost	η [%]	93,1

Tabulka 6-2: Výsledky simulace zjednodušeného výchozího modelu stroje

6.1.1.3 Nevyváženost radiálních sil působících na rotor

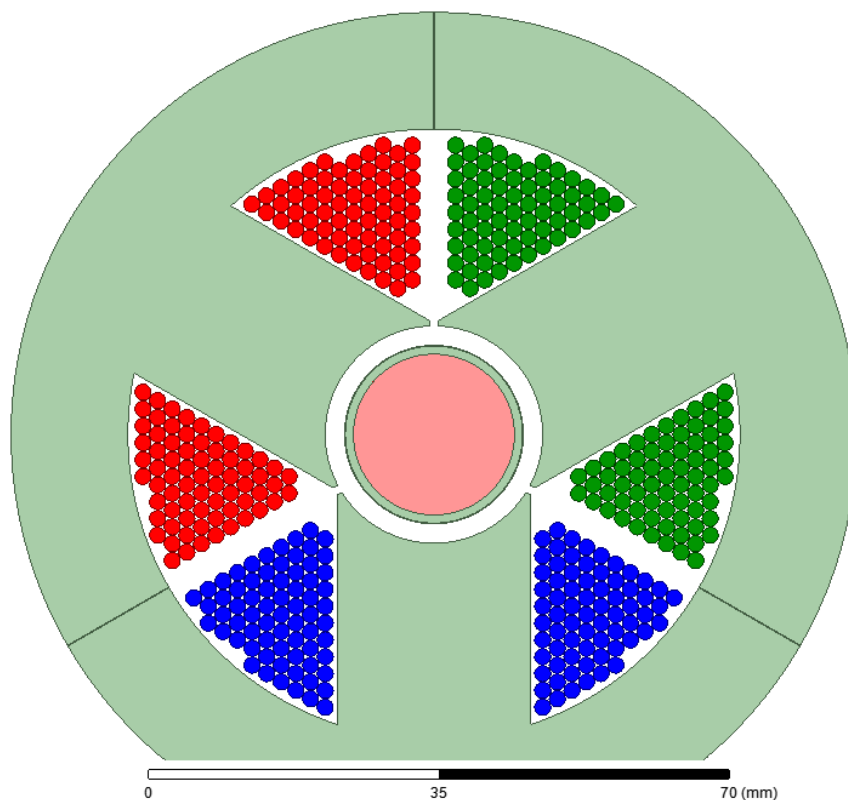


Obr. 6-4: Radiální síly působící na rotor

Jak ukazuje obrázek 6-4, při konfiguraci statoru se třemi zuby vzniká nevyváženost radiálních sil působících na rotor. Amplituda výslednice těchto sil dosahuje 8,4 N. Vzhledem k tomu, že navrhovaný stroj má vzduchová ložiska, jsou takto velké radiální síly nežádoucí. Účinné opatření pro snížení amplitudy výsledné síly je zvětšení počtu zubů. Z tohoto důvodu bude mít stator upraveného modelu vyšší počet zubů ze tří na šest.

6.1.2 Model s vlivem skin a proximity efektu

Ve výchozím modelu s vlivem skin efektu je drážka zaplněna způsobem, kdy je dosaženo maximální plnění drážky. Průměr vodičů vinutí je 2 mm. Počet závitů a další parametry stroje jsou stejné jako ve zjednodušeném modelu.



Obr. 6-5: Výchozí model stroje s drážkami

6.1.2.1 Výsledky simulace

Ztráty v železe	ΔP_{Fe} [W]	65,3
Ztráty v čelech vinutí	ΔP_{CuK} [W]	82,6
Ztráty v aktivní části vinutí	ΔP_{Cu} [W]	39,6
Ztráty v rotoru	ΔP_{Rot} [W]	76,8
Výkon	P [W]	3032,6
Příkon	P_{p} [W]	3296,9
Účinnost	η [%]	92,0

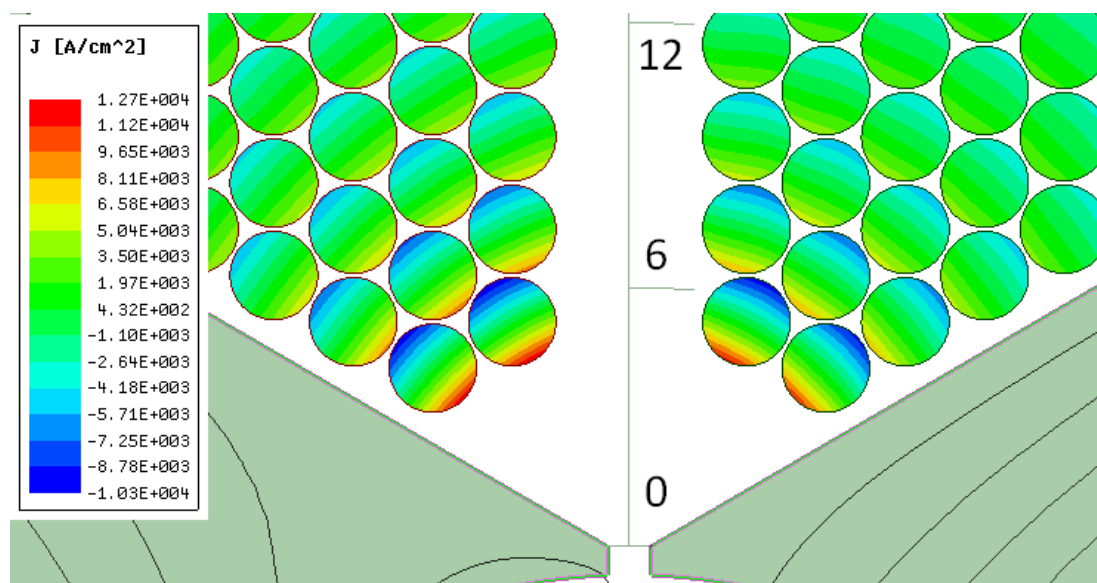
Tabulka 6-3: Výsledky simulace výchozího modelu stroje

Tabulka 6-3 zobrazuje výsledky simulace výchozího modelu stroje s vlivem skin a proximity efektu. Na první pohled jsou zde patrné značně menší ztráty v aktivní části vinutí oproti výchozímu bezdrážkovému modelu z kapitoly 5.1.2. Ztráty v aktivní části vinutí dosahují 39,6 W v čelech vinutí 82,6 W. To je dáno především velkou délkou čel vinutí jednoho závitu, odhadnuto na délku 125 mm a odpor 1 Ω .

Délka aktivní části jednoho závitu je 20 mm. Stroj dosahuje bez započtení mechanických ztrát účinnosti 92 %.

6.1.2.2 Vliv proximity efektu na proudovou hustotu ve vinutí

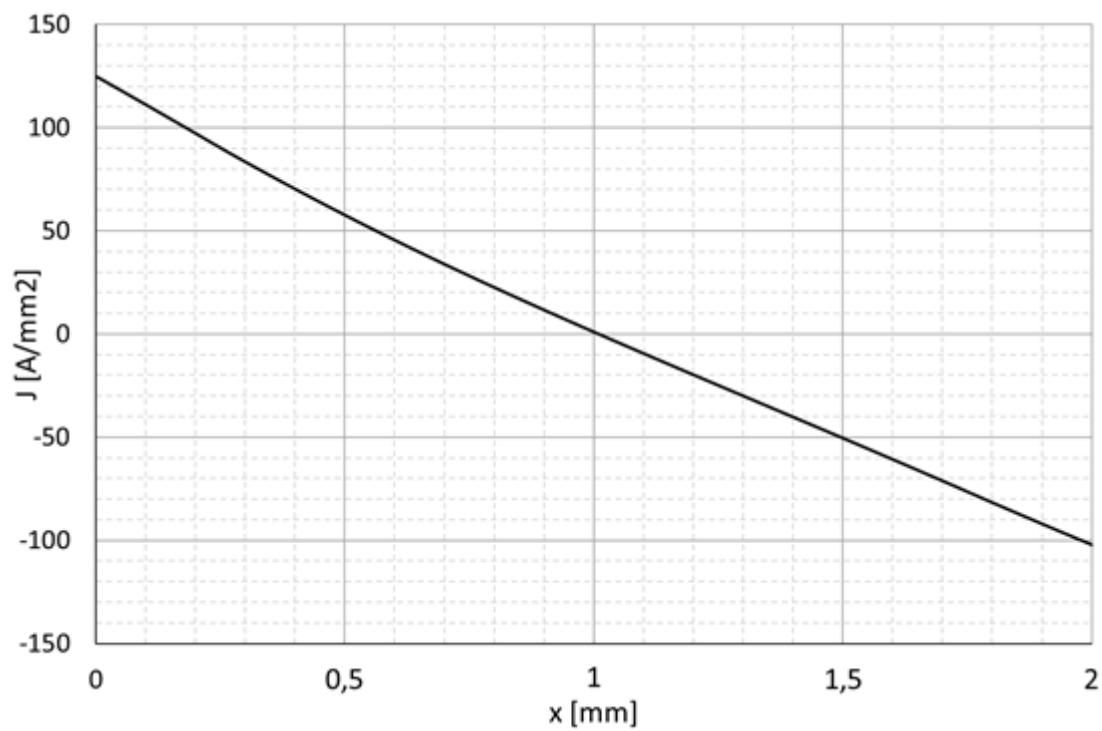
Obrázek 6-6 zobrazuje rozložení proudové hustoty ve vodičích vinutí v okamžiku maxima vzniklých vířivých proudů. Je zde jasně patrné, že největší vliv má proximity efekt na vodiče nacházející se blízko otevření drážky. Touto oblastí prochází největší rozptylový, tím pádem je zde největší změna magnetické indukce generující proximity efektu.



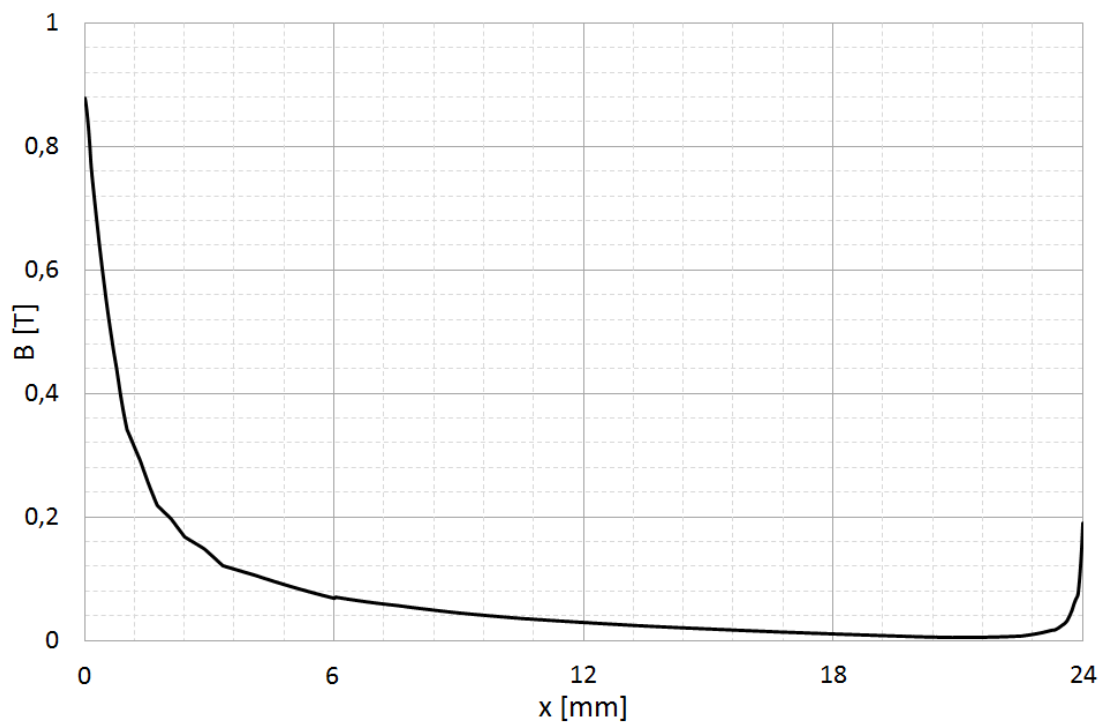
Obr. 6-6: Proudová hustota ve vinutí výchozího modelu

Rozložení proudové hustoty ve vodiči v blízkosti otevření drážky je zobrazeno na obrázku 6-7. Proudová hustota na jednom okraji vodiče dosahuje hodnoty 127 A/mm². Tato hodnota je vysoká a vznikající ztráty by značně tepelně namáhaly izolaci vodiče.

Graf 6-8 zobrazuje průběh magnetické indukce středem drážky. Bod $x = 0$ mm se nachází v otevření zubu, bod $x = 24$ mm se nachází na druhé straně drážky u jha. Na obrázku 6-6 jsou souřadnice z grafu 6-8 vyznačeny. Jak je z grafu patrné, magnetická indukce strmě klesá se vzdáleností od otevření drážky. Proto je výhodné umístit vodiče vinutí dál od otevření a v upraveném modelu bude vliv umístění vodičů zkoumán.



Obr. 6-7: Rozložení proudové hustoty ve vodiči v blízkosti otevření drážky



Obr. 6-8: Rozložení magnetické indukce v drážce

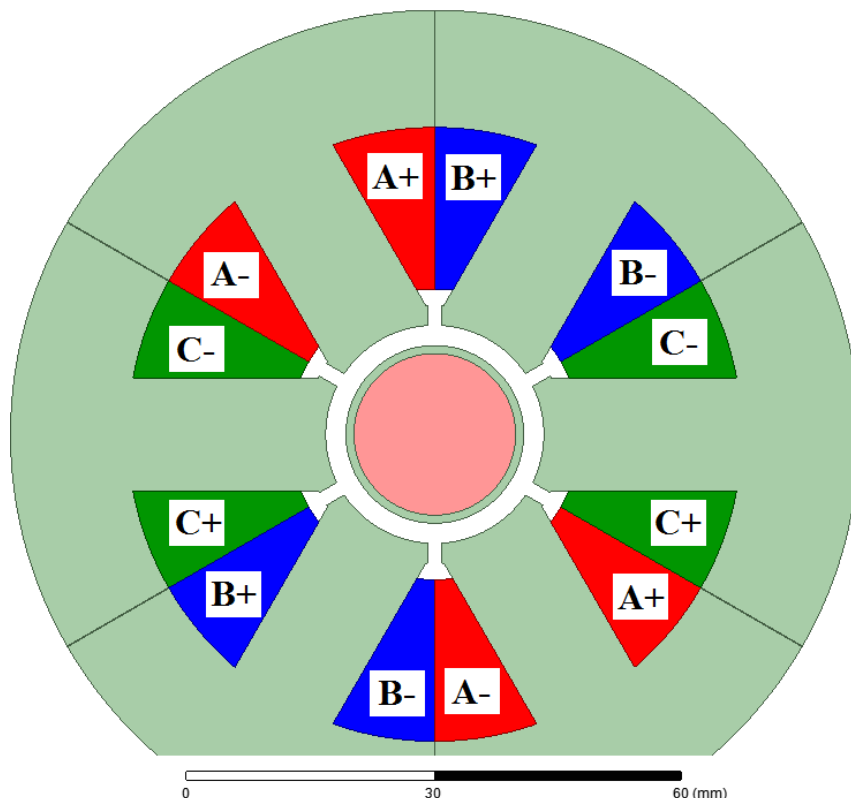
6.2 Upravený návrh

Vzhledem k velkému problému nevyváženosti radiálních sil působících na rotor při použití statoru se třemi zuby v kombinaci se vzduchovým ložiskem je v dalším návrhu stroje zvýšen počet zubů statoru na šest. Tímto se však zvýší řád vyšší harmonické vzniklé drážkováním rotoru, to by mohlo vést k nežádoucímu zvýšení ztrát v titanové objímce a permanentním magnetu.

Dále bude v modelu zkoumán vliv umístění vodičů v drážce na ztráty ve vinutí. Pro finální návrh budou tyto poznatky zohledněny.

6.2.1 Zjednodušený model

Na obrázku 6-9 je zobrazen zjednodušený upravený model stroje s drážkami. Ve zjednodušeném modelu stroje byla modelována následující konfigurace stroje. Počet zubů je 6, každý se šířkou 14 mm. Počet závitů v jedné fázi je 140. Pro omezení amplitudy vyšších harmonických má vzduchová mezera 2,5 mm.



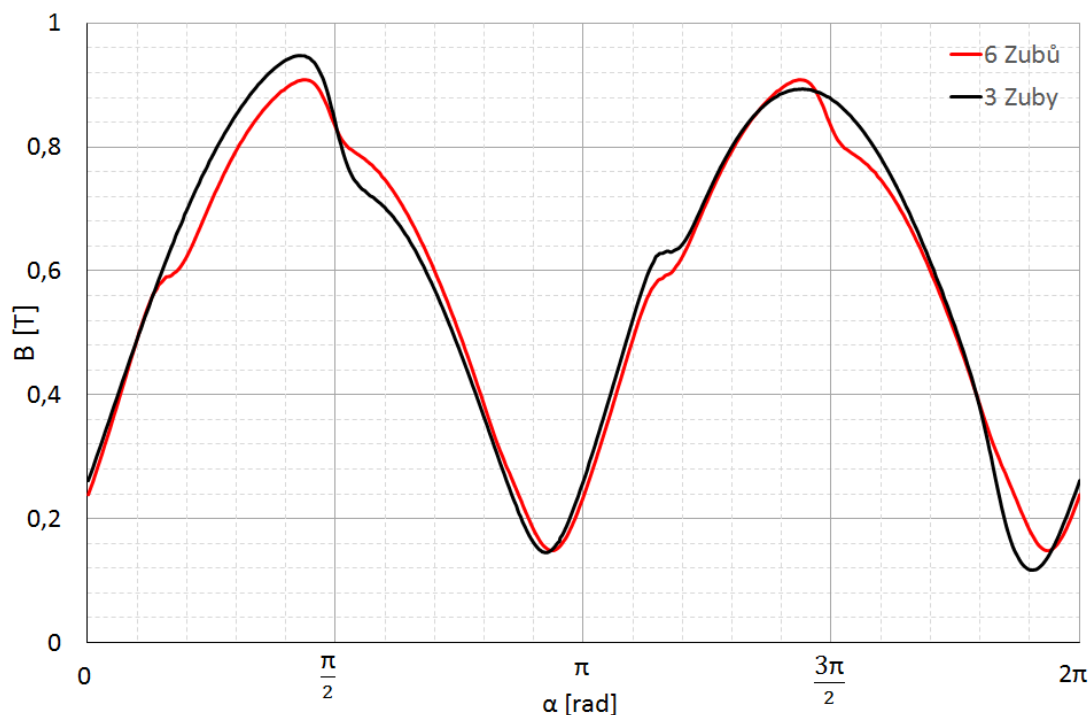
Obr. 6-9: Zjednodušený upravený model

6.2.1.1 Výsledky simulace

Tabulka 6-4 zobrazuje výsledky simulace zjednodušeného upraveného modelu. Vzhledem ke zvýšenému počtu závitů oproti předchozím modelům je odhadnutý odpor čel vinutí $2\ \Omega$. Na tomto odporu vzniká většina z $149,4\ \text{W}$ ztrát ve vinutí. Jiné rozložení toku ve statoru jsou ztráty v železe oproti předchozím modelům nižší, dosahují $49,8\ \text{W}$. Ztráty v rotoru jsou $13,2\ \text{W}$. To je oproti modelu se třemi zuby přibližně šestkrát nižší. Možné vysvětlení je, že zuby v blízkosti otevření nejsou u tohoto modelu přesycovány. Zvýšením počtu zubů ze třech na šest bylo dosaženo snížení výslednice radiálních sil působících na rotor na $0,35\ \text{N}$ v maximu.

Ztráty v železe	$\Delta P_{\text{Fe}} [\text{W}]$	49,8
Ztráty ve vinutí	$\Delta P_{\text{Cu}} [\text{W}]$	149,4
Ztráty v rotoru	$\Delta P_{\text{Rot}} [\text{W}]$	13,2
Výkon	$P [\text{W}]$	3044,6
Příkon	$P_p [\text{W}]$	3257,0
Účinnost	$\eta [\%]$	93,5

Tabulka 6-4: Výsledky simulace zjednodušeného upraveného modelu



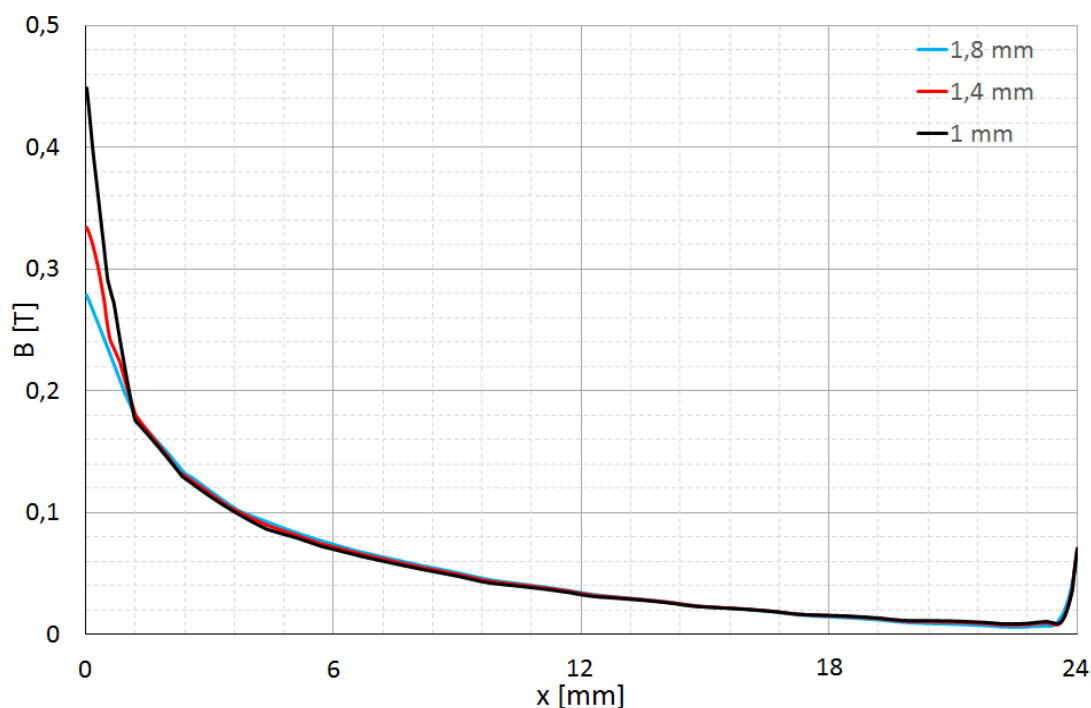
Obr. 6-10: Průběh indukce ve vzduchové mezeře upraveného stroje

6.2.1.2 Vliv otevření na průběh magnetické indukce v drážce

Graf 6-15 ukazuje vliv velikosti otevření drážky na průběh magnetické v drážce. Z grafu je patrné zvýšení magnetické indukce při menším otevření drážky. Toto zvýšení je poměrně velké, ale je omezené pouze na přímé okolí otevření drážky. Přibližně od vzdálenosti 1 mm je rozdíl průběhů indukci zanedbatelný, tím je vliv otevření zanedbatelný i na intenzitu proximity efektu, pokud jsou vodiče umístěny dále. Zvýšení indukce v okolí otevření je dáno zvětšeným rozptylovým tokem při nižším otevření drážky.

Další vliv většího rozptylového toku je snížení maximálního výkonu, kterého je schopen generátor dosáhnout.

V tabulce 6-5 jsou ztráty v rotoru v závislosti na otevření drážky. Snížení ztrát při zmenšování otevření drážek je velmi malé. Vzhledem ke všem zmíněným efektům otevření drážek je nejvýhodnější původně zvolená hodnota 1,8 mm.



Obr. 6-11: Průběh magnetické indukce pro různá otevření drážek

Otevření drážky	x [mm]	1,8	1,4	1,0
Ztráty v rotoru	ΔP_{Rot} [W]	13,1	12,9	12,6

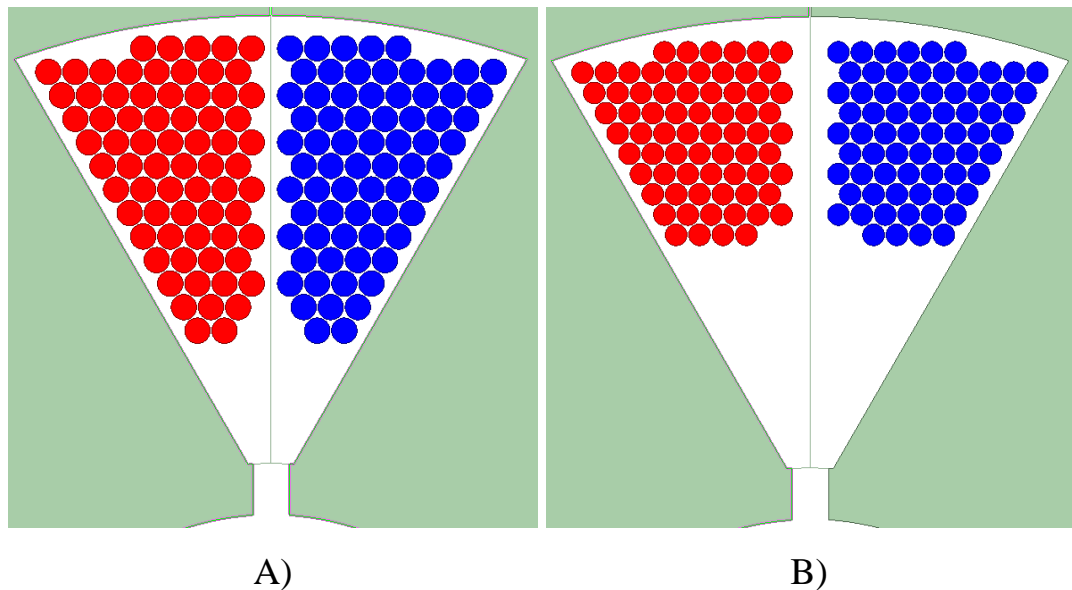
Tabulka 6-5: Vliv otevření drážek na ztráty v rotoru

6.2.2 Model s vlivem skin a proximity efektu

Ve výchozím modelu s vlivem skin efektu je drážka zaplněna způsobem, kdy je dosaženo maximální plnění drážky. Průměr vodičů vinutí je 2 mm. Počet závitů a další parametry stroje jsou stejné jako ve zjednodušeném modelu.

6.2.2.1 Vliv zaplnění drážky na ztráty ve vinutí

Jak naznačuje obrázek 6-11 zjednodušeného modelu, největší hodnota magnetické indukce v drážce je v blízkosti otevření drážky. Tím pádem je zde i největší změna indukce a nejsilnější proximity efekt. Umístěním vodičů blíže ke jhu statoru a ponecháním zbytku drážky prázdným, povede ke snížení vlivu proximity efektu na vodiče vinutí. Obrázek 6-12 zobrazuje dvě různé konfigurace vinutí v drážce. Pro každou variantu byl vytvořen vlastní model. Průměr vodičů se mění dle zaplněné plochy v drážce, počet závitů zůstává stejný jak ve zjednodušeném modelu $N = 140$.



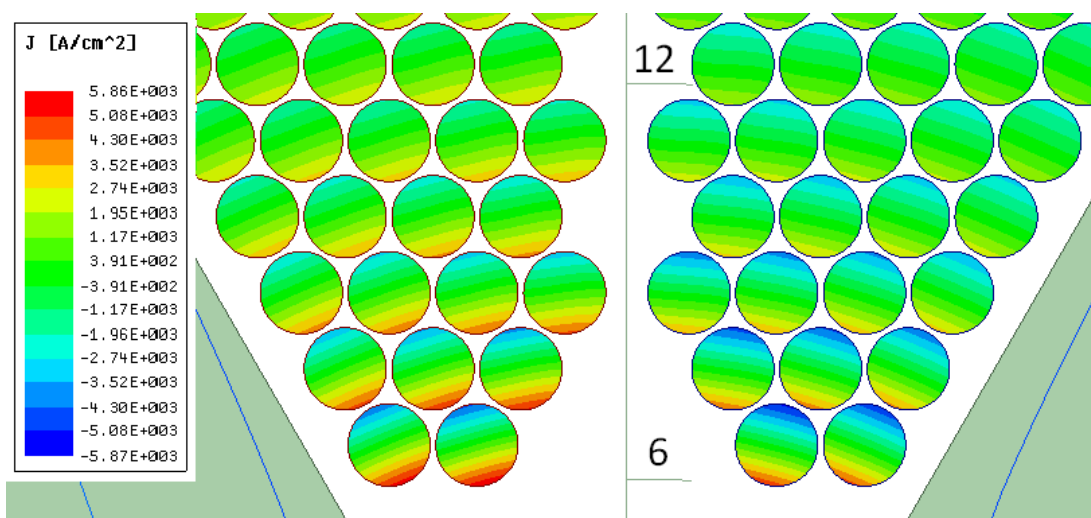
Obr. 6-12: Modelovaná zaplnění drážek

Zaplnění drážky		A	B
Průměr vodiče	d_{Cu} [mm]	1,25	1,06
Odhadnutý odpor čel vinutí	R_K [Ω]	1,5	2,0
Ztráty v čele vinutí	ΔP_{CuK} [W]	105,1	145,6
Ztráty v aktivní části vinutí	ΔP_{Cu} [W]	17,6	11,8
Maximální proudová hustota	J_{max} [A/mm ²]	58,5	39,0

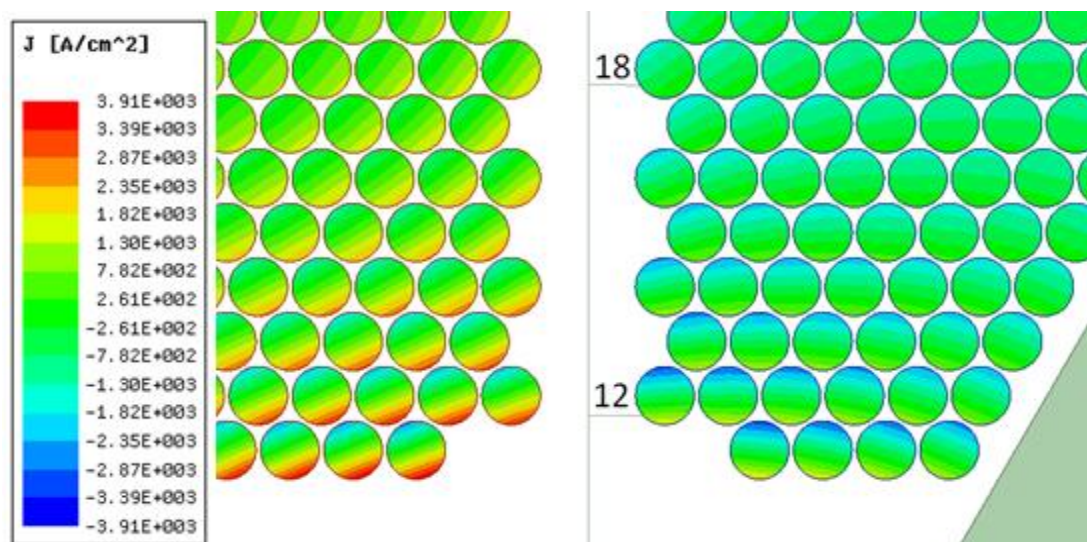
Tabulka 6-6: Ztráty ve vinutí pro různé konfigurace zaplnění drážky

Tabulka 6-6 zobrazuje závislost ztrát ve vinutí a maximální proudové hustoty na umístění vodiče v drážce a průměru vodiče. Z tabulky je stejně jako v předchozím modelu se třemi drážkami patrné, že největší podíl na ztrátách ve vinutí mají ztráty vznikající na odporu čel vinutí. S menším zaplněním drážky klesají z důvodu menšího vlivu proximity efektu ztráty v aktivní části vinutí. Ztráty v čelech vinutí však použitím menšího průměru vodičů stoupají. Růst ztrát v čelech je větší než pokles ztrát v aktivní části vinutí, tudíž je z hlediska ztrát nejvýhodnější varianta plnění drážky A. Maximální hodnota proudové hustoty v této variantě dosahuje poměrně vysoké hodnoty 58,6 A/mm². Tím by bylo pravděpodobně lokálně zvýšené namáhání izolace. Použitím varianty B by bylo toto namáhání menší.

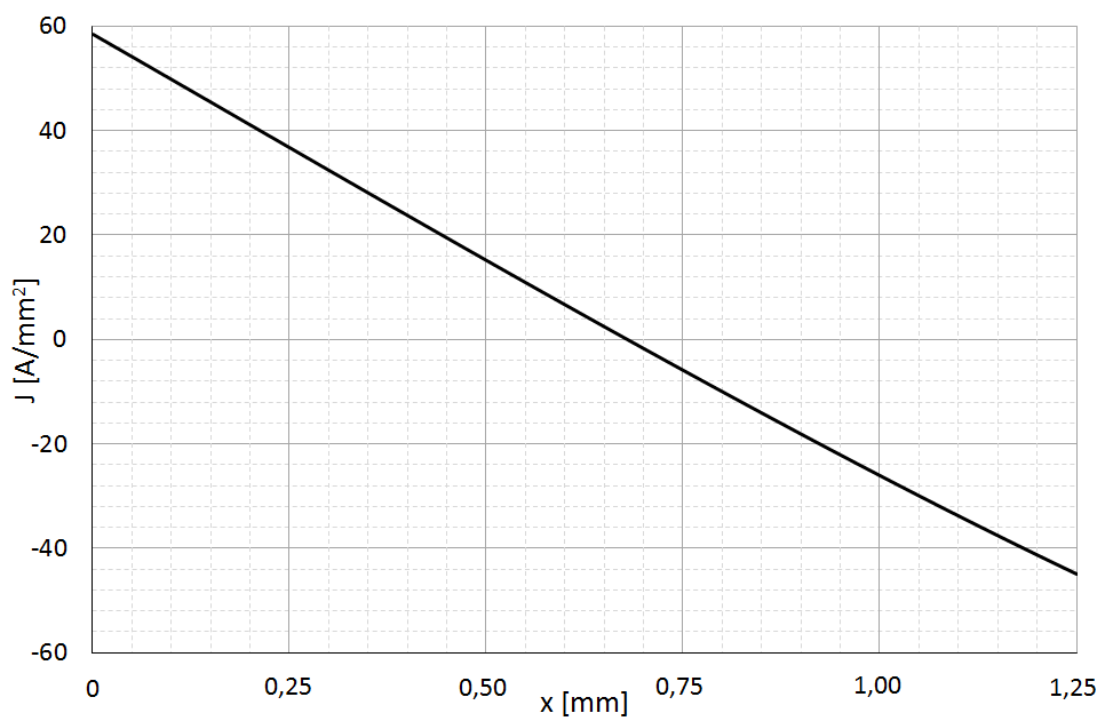
Zaplnit drážku méně by již nemělo z hlediska celkových ztrát smysl, ztráty v čelech vinutí, které tvoří většinu ztrát, by značně vzrostly.



Obr. 6-13: Proudová hustota ve vinutí upraveného modelu s vinutím A



Obr. 6-14: Proudová hustota ve vinutí upraveného modelu s vinutím B



Obr. 6-15: Průběh proudové hustoty ve vodiči s největším vlivem proximity efektu, varianta vinutí A

Zaplnění drážky		A	B
DC odpor aktivní části vinutí	R_{DC} [mΩ]	3,92	5,46
AC odpor aktivní části vinutí	R_{AC} [mΩ]	251,2	162,1

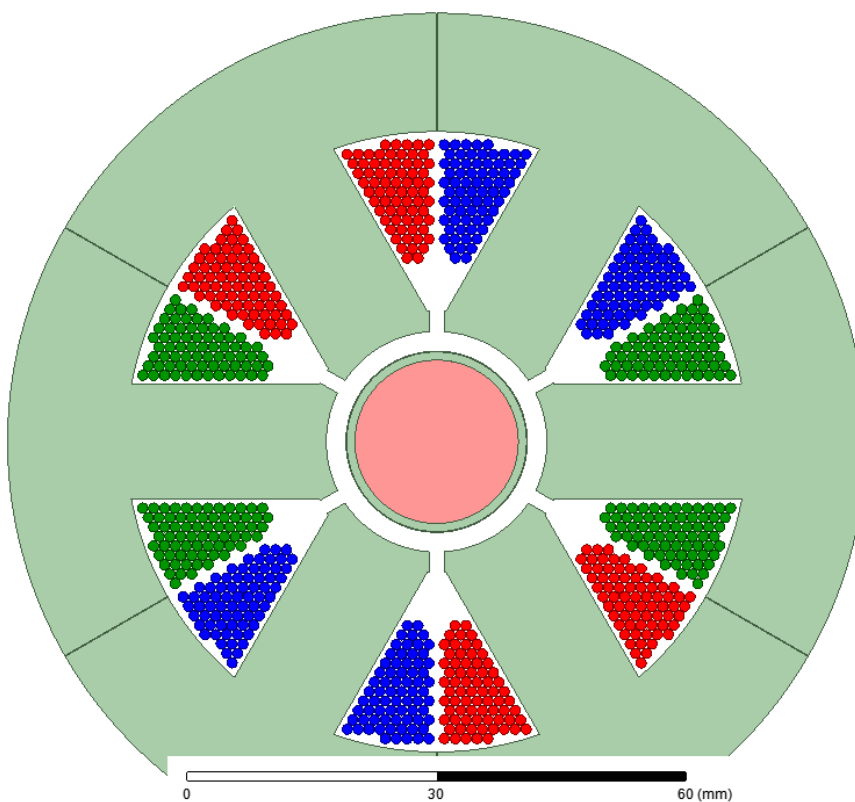
Tabulka 6-7: Porovnání AC a DC odporů aktivní části vinutí

Pro hodnocení míry vlivu skin a proximity efektu na vodiče je vhodné použít srovnání DC a AC odporu. V případě navrhovaného stroje je díky velmi malé délce stroje velmi malý DC odpor. Tím i při zvýšení odporu ve variantě zaplnění drážky A 64krát a u varianty B 30krát jsou nejspíše vzniklé ztráty velké a celkovou účinnost stroje příliš neklesá.

Ztráty u jednoduchých vodičů bez paralelních větví jsou relativně nízké, tudíž není vhodné použít vodič s nekroucenými paralelními větvemi, kde by vznikaly svazkové proudy. Použití vodičů typu Litz není s dostupnými technickými prostředky možné ověřit simulací.

6.2.2.2 Celkové výsledky simulace upraveného modelu

Celkové výsledky simulace jsou uvedeny pro model s konfigurací vinutí A. Tento model dosahuje nejvyšší účinnosti.



Obr. 6-16: Upravený model s vlivem skin a proximity efektu

Tabulka 6-8 zobrazuje výsledky simulace upraveného modelu. Ztráty v čelech vinutí dosahují 105,1 W, tato hodnota je nižší oproti zjednodušenému modelu z důvodu, že odpor čel zjednodušeného modelu byl tvořen pro variantu vinutí B a je tak vyšší.

Ztráty v aktivní části vinutí dosahují 17,6 W, ztráty v rotoru 12,5 W a ztráty v železe 50,7 W. Model dosahuje bez započtení mechanických ztrát účinnosti 94,1 %.

Ztráty v železe	ΔP_{Fe} [W]	50,7
Ztráty v čele vinutí	ΔP_{CuK} [W]	105,1
Ztráty v aktivní části vinutí	ΔP_{Cu} [W]	17,6
Ztráty v rotoru	ΔP_{Rot} [W]	12,5
Výkon	P [W]	2974,6
Příkon	P_{p} [W]	3160,5
Účinnost	η [%]	94,1

Tabulka 6-8: Výsledky simulace upraveného modelu s vinutím A

Vzhledem k vysoké dosažené účinnosti v simulaci stroje navrženého v této kapitole lze takto navrhnutý stroj doporučit pro výrobu prototypu a následné testování. Pro dosažení vyšší účinnosti je vhodné zaplnit drážky podle varianty A. Výroba a testování prototypu není obsahem této práce.

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo vytvořit návrh vysokootáčkového synchronního generátoru s permanentními magnety o jmenovitém výkonu 3 kW při 230000 ot/min a demonstrovat na něm možné metody potlačení skin a proximity efektu. Pro tento účel bylo vytvořeno několik 2D modelů v simulačním programu pro výpočet metodou konečných prvků Ansys Maxwell. Stroj byl simulován v motorickém režimu.

Byly zvoleny dva způsoby konstrukce stroje, s bezdrážkovým statorem a se statorem s drážkami. Stator je tvořen plechy NO10. Rotor je tvořen permanentním magnetem N52M vsazeným do titanové objímky. Ložiska stroje byla zvolena vzduchová.

Jako první byl modelován stroj s bezdrážkovým statorem. Výchozí model stroje byl sestaven bez jakýchkoliv opatření pro potlačení vlivu skin a proximity efektu. Byl sestaven model s kruhovými vodiči a model s obdélníkovými vodiči. Oba modely dosahovaly účinnosti velmi nízké účinnosti, pod 30 %. Použitím bezdrážkového statoru je vinutí stroje vystaveno celému magnetizačnímu toku stroje, proximity efekt výrazně zvyšuje ztráty stroje. V jedné části nejvíce ovlivněného vodiče dosahovala proudová hustota až téměř 600 A/mm^2 a ztrát ve vinutí okolo 9 kW. Tímto modelem je demonstrováno, jak velký může mít proximity efekt na ztráty vliv a nutnost jeho potlačení.

Pro potlačení proximity efektu v bezdrážkovém stroji bylo zvoleno jako nejvhodnější řešení použití vodiče typu Litz. Pro dosažení dobré účinnosti by bylo nutné použít Litz tvořený velkým množstvím paralelních vodičů o velmi malém průměru. Pro ověření snížení ztrát byl vytvořen 3D model vinutí tvořeného vodičem typu Litz se třemi paralelními větvemi. Jelikož se jedná o komplikovaný model, s dostupnými technickými prostředky nebyl výpočet úspěšný.

Druhý návrh stroje obsahuje stator s drážkami. Nevýhoda tohoto řešení je vznik vyšších harmonických ve vzduchové mezeře kvůli drážkování statoru, které vyvolávají v titanové objímce a permanentním magnetu ztráty vířivými proudy. Snížení amplitudy vyšších harmonických bylo dosaženo prodloužením vzduchové mezery. V prvotním modelu měl stator tři zuby. Výsledky však ukázaly vznik

nevyvážených radiálních sil působících na rotor, což je při použití vzduchových ložisek nežádoucí. Vzhledem k malé délce stroje, pouze 10 mm, jsou ztráty ve vinutí tvořeny především ztrátami v čelech vinutí. Ztráty v aktivní části vinutí dosahovaly 39,6 W, největší proudová hustota ve vodiči byla 127 A/mm².

V dalším modelu byl zvýšen počet zubů statoru na šest. Tím byla odstraněna nevyváženost radiálních sil působících na rotor. Bylo zde zjištěno, že otevření drážky nemá velký vliv na průběh magnetické indukce v drážce, tím ani na proximity efekt ve vodičích. Velký vliv na proximity efekt má však umístění vodičů v drážce. Při menším zaplnění drážky a umístění vinutí dále od otevření drážky jsou vodiče vystaveny menší změně magnetické indukce, to v kombinaci s jejich menší fyzickými rozměry snižuje vliv proximity efektu. Při nižším plnění drážky a snižujícím se průřezu vodičů však roste odpor čel vinutí, které tvoří hlavní část ztrát ve vinutí. Pro dosažení největší účinnosti stroje je tudíž vhodnější vyšší plnění drážek i přes vyšší ztráty způsobené skin a proximity efektem. Výsledný návrh stroje dosahuje bez zahrnutí mechanických ztrát dle výsledku simulací účinnosti 94,1 %. Ztráty v aktivní části vinutí, kde se projevuje proximity efekt dosahovaly 17,6 W. Maximální proudová hustota ve vodiči byla 59 A/mm². Tento výsledný návrh stroje je vhodný pro konstrukci prototypu. Výroba a testování prototypu není součástí této práce.

Literatura

- [1] D. Gerada, A. Mebarki, N. L. Brown, C. Gerada, A. Cavagnino and A. Boglietti, "High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 6, pp. 2946-2959, June 2014. doi: 10.1109/TIE.2013.2286777 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6644302&isnumber=6690243>
- [2] YONGXIAO CHEN, JIANXIN SHEN a ZEMIN FANG. Topology and preliminary design of slotless brushless DC motor. In: Electric Machines and Drives Conference Record, 1997. IEEE International[online]. IEEE Publishing, 1997, WB2/7.1-WB2/7.3 [cit. 2019-01-07]. DOI: 10.1109/IEMDC.1997.604311. ISBN 0780339460.
- [3] FERREIRA, J.a. Analytical computation of AC resistance of round and rectangular litz wire windings. IEE Proceedings B: Electric Power Applications [online]. 1992, 139(1), 21-25 [cit. 2019-01-07]. ISSN 01437038.
- [4] VAN DER GEEST, Martin;polinder. Stator winding proximity loss reduction techniques in high speed electrical machines. In: Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International[online]. IEEE, 2013, s. 340-346 [cit. 2019-01-07]. DOI: 10.1109/IEMDC.2013.6556273. ISBN 9781467349758.
- [5] POPESCU, Mircea;dorrell. Proximity Losses in the Windings of High Speed Brushless Permanent Magnet AC Motors With Single Tooth Windings and Parallel Paths. Magnetics, IEEE Transactions on[online]. USA: IEEE, 2013, 49(7), 3913-3916 [cit. 2019-01-07]. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2247382. ISSN 0018-9464.
- [6] PETROV, Ilya;polikarpova. Investigation of additional AC losses in tooth-coil winding PMSM with high electrical frequency. In: Electrical Machines (ICEM), 2016 XXII International Conference on [online]. IEEE, 2016, s. 1841-1846 [cit. 2019-01-07]. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732774.
- [7] BARTOLI, M.;noferi. Modeling Litz-wire winding losses in high-frequency power inductors. In: Power Electronics Specialists Conference, 1996. PESC '96 Record., 27th Annual IEEE [online]. IEEE Publishing, 1996, 2, s. 1690-1696 [cit. 2019-01-07]. DOI: 10.1109/PESC.1996.548808. ISBN 0780335007. ISSN 0275-9306.

- [8] REDDY, Patel b.;jahns. Analysis of bundle losses in high speed machines. In: Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International [online]. IEEE Publishing, 2010, s. 2181-2188 [cit. 2019-01-07]. DOI: 10.1109/IPEC.2010.5542354. ISBN 978-1-4244-5394-8.
- [9] LAMMERANER, Jiří a Miloš ŠTAFL. Eddy Currents. London: Iliffe Books, 1964, 233 s.
- [10] JIANCHENG, F.;xiquan. Analysis of circulating current loss for high-speed permanent magnet motor. IEEE Transactions on Magnetics [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, 51(1), <xocs:firstpage xmlns:xocs=""/> [cit. 2019-01-07]. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2302412. ISSN 00189464.
- [11] PYRHONEN, J.; JOKINEN t.; HRABOVCOVÁ V. Design of rotating eletrical machines. John Wiley and Sons, 2007. ISBN 978-0-470-69516-6.

Seznam symbolů a zkratek

Symbols:

B	[T]	Magnetická indukce
d_{Cu}	[m]	Průměr vodiče
e	[-]	Eulerovo číslo
f	[Hz]	Frekvence
J	[A/m ²]	Proudová hustota
J_0	[A/m ²]	Průměrná proudová hustota
J_{max}	[A/m ²]	Maximální proudová hustota
l	[m]	Délka
P	[W]	Výkon
ΔP_{Cu}	[W]	Ztráty ve vinutí
ΔP_{CuK}	[W]	Ztráty v čele vinutí
ΔP_{Fe}	[W]	Ztráty v železe
ΔP_{Rot}	[W]	Ztráty v rotoru
P_{p}	[W]	Příkon
R_{AC}	[Ω]	Střídavý odpor
R_{DC}	[Ω]	Stejnoseměrný odpor
R_{K}	[Ω]	Odpor čel vinutí
x	[m]	Vzdálenost
δ	[m]	Hloubka vniku
μ	[H/m]	Permeabilita
η	[%]	Účinnost
ρ	[Ω · m ⁻¹]	Měrný odpor

Zkratky:

Al	Hliník
B	Bor
Be	Beryllium
Co	Kobalt
Cu	Měď
Fe	Železo
Nd	Neodym
O	Kyslík
Sm	Samarium
Zr	Zirkonium